НАЦІОНАЛЬНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ✦ Виходить 6 разів за рік

КИЇВ **Том 8, № 2/3, 2002** **KYIV**

Спеціальний випуск журналу складається з доповідей наукової конференції «Аерокосмічні дослідження Землі: тенденції і перспективи», що відбулася 27 травня 2002 року в Києві. Його тема — сучасні методи та апаратура аерокосмічних зйомок, тематична інтерпретація одержаних матеріалів.

Редактор випуску — член-кореспондент НАН України В. І. Лялько.

* * *

This special issue of the journal includes the reports presented at the Conference "Aerospace Researches of the Earth: Tendencies and Perspectives", held in Kyiv on 27 May 2002. The topics discussed are modern techniques and instrumentation for aerospace survey and thematic interpretation of remote sensing data.

The Editor of this issue is V. I. Lalko, Corresponding Member, NAS of Ukraine.

© Національне космічне агентство України, Національна академія наук України, 2002

ЗМІСТ

Лялько В. І. Передмова 5

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Лялько В. І., Федоровський О. Д., Перерва В. М., Попов М. О. Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (короткий історичний нарис) 6

Лялько В. І. Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні 29

Щепець М. С. Спільно дбаємо про Київ 35

Цимбал В. М., Лялько В. І., Курекін О. С., Гавриленко О. С. Авіаційний комплекс АКДЗ-30 дистанційного зондування природного середовища 36

Волошин В. І., Драновський В. Й., Бушуєв Є. І. Стан, перспективи та проблеми ринку послуг дистанційного зондування Землі з космосу 41

Волошин В. И., Драновский В. И., Бушуев Е. И. Экология и космос 52

Комісарчук А. А. Питання аерокосмічного моніторингу і його особливості в Західному регіоні України 56

Мазуркевич О. О., Рябоконенко О. Д. Особливості співпраці державних та недержавних установ в напрямку дистанційного зондування Землі в Україні 58

Придатко В. І., Штепа Ю. М. Принципово нові можливості для формування екомережі в Україні у зв'язку з появою досвіду цільової обробки та інкорпорації космознімків в ГІС 59

Готинян В. С., Дронова І. С. Деякі тенденції в дистанційному зондуванні Землі (за зарубіжними матеріалами) 65

Готынян В. С., Буйницкий И. О., Минкевич Н. А. Опыт создания цифрового изображения Украины по космическим снимкам высокого разрешения 70

ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ ДЗЗ

Федоровский А. Д., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Обоснование алгоритма формирования состава космического аппаратурного комплекса для выполнения научно-прикладной программы ДЗЗ 73

Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Рябоконенко С. А., Пахомов И. П., Суханов К. Ю. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа 76

Федоровский А. Д., Якимчук В. Г. Имитационное моделирование космических исследований ДЗЗ: постановка задачи и пути решения 83

Сахацький О. І., Сибірцева О. М., Шпортюк З. М. Комбінація цифрової моделі рельєфу із зображеннями «Landsat-7» для визначення топографічних характеристик місцевості з метою проведення радіометричної корекції 89

Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками 91

Станкевич С. А. К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков 103

CONTENTS

Lyal'ko V. I. Foreword 5

GENERAL PROBLEMS IN THE PROGRESS OF THE REMOTE SENSING OF THE EARTH

Lyal'ko V. I., Fedorovs'kyi O. D., Pererva V. M., and Popov M. O. Center for Aerospace Investigations of the Earth with the Institute of Geological Sciences, NAS Ukraine (brief history) 6

Lyal'ko V. I. Present state of the art and prospects of aerospace investigations of the Earth in Ukraine 29

Schepets' M. S. We together take care of Kyiv 35

Tsymbal V. M., Lyal'ko V. I., Kurekin O. S., and Havrylenko O. S. Aircraft complex AKDZ-30 for remote sensing of environment 36

Voloshyn V. I., Dranovs'kyi V. Y., and Bushuiev Ye. I. Present state, prospects, and problems of the service market in the remote sensing of the Earth 41

Voloshin V. I., Dranovskii V. I., and Bushuev E. I. Ecology and open space 52

Komissarchuk A. A. Aerospace monitoring and its features in the western regions of Ukraine 56

Mazurkevich O. O. and Ryabokonenko O. D. Co-operation of state and nonstate institutions in the RSE in Ukraine 58

Prydatko V. I. and Shtepa Yu. M. Radically new possibilities for forming an ecological network in Ukraine based on the experience on specific processing and incorporation of space images into geoinformation systems 59

Hotynyan V. S. and Dronova I. S. Some trends in the RSE (review of foreign publications) 65

Gotynyan V. S., Buinitnitskii I. O., and Minkevich N. A. Experience in building a digital picture of Ukraine from high-resolution space images 70

GENERAL THEORETICAL AND METHODOLOGICAL PROBLEMS IN THE RSE

Fedorovskii A. D., Zubko V. P., and Yakimchuk V. G. Mathematical basis of an algorithm for the formation of space equipment complex for a scientific and applied RSE program 73

Fedorovskii A. D., Yakimchuk V. G., Ryabokonenko S. A., Pakhomov I. P., and Sukhanov K. Yu. Interpreting space images of landscape systems on the basis of structural analysis 76

Fedorovskii A. D. and Yakimchuk V. G. RSE simulation: Formulation of the problem and lines of attack on it 83

Sakhats'kyi O. I., Sybirtseva O. M., and Shportyuk Z. M. Combining a digital relief model with Landsat 7 images for the determination of topographic terrain characteristics for purposes of radiometric correction 89

Kononov V. I. Basis of a technique for determining the resolution of aerospace systems with discrete photodetectors 91

Stankevich S. A. Estimating the linear resolution of digital aerospace images 103

Підп. до друку 30.04.02. Формат 84×108/16. Папір офс. № 1. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 31.08. Обл.-вид. арк. 31.0 Тираж 700 екз. № замовлення 453

Друкарня МКП «Компанія Ваіте», 01042, Київ, вул. Патріса Лумумби 7

Порхун О. А. Застосування геоінформаційних систем (ГІС) при дешифруванні аерокосмічних зображень 106

Попов М. О. Сучасні погляди на інтерпретацію даних аерокосмічного дистанційного зондування Землі 110

Костюченко Ю. В. Опыт применения спутниковой интерферометрии в комплексе методов ДЗЗ 115

Смирнов С. А., Панова Н. В. Атмосферна корекція у видимому діапазоні, оцінювання ОПФ атмосфери 122

Кравчук Т. А., Ненахов А. Н., Гимельфарб Г. Л., Михалевич Б. О. Технология построения трехмерных карт внутренних помещений объекта «Укрытие» 127

ВИРІШЕННЯ ТЕМАТИЧНИХ ЗАДАЧ

Геологічні задачі

Азімов О. Т. Комплексні аерокосмогеологічні дослідження території Зони відчуження ЧАЕС і прилеглого району Коростенського плутону при виборі локальних площадок, придатних для глибинного депонування радіоактивних відходів 134

Пазинич В. Г., Пазинич Н. В. Тектонічна активність осадових басейнів, як закономірний етап їхнього розвитку 142

Крат В. Н., Вульфсон Л. Д., Гунченко В. А., Оголенко В. С., Кудряшов А. И., Авраменко В. Г. Особенности применения материалов дистанционных аэрокосмических съемок при поисках азотных кремнистых терм 143

Воробьев А. И., Костюченко Ю. В., Лялько В. И., Перерва В. М., Семенова С. Г. Комплексирование аэрокосмических и геофизических методов при прогнозе нефтегазоносности северо-западного шельфа Черного моря 149

Подорван В. Н., Филиппов Ю. Ф. Наземная заверка результатов дистанционного зондирования гидрогеологических объектов 166

Філіпович В. Є., Приходько В. Л., Тарангул Д. О. Особливості комплексування дистанційних та традиційних методів при пошуках руд кольорових металів 170

Перерва В. М. Геофлюидодинамические структуры литосферы и их изучение дистанционными методами 174

Котляр О. Ю., Товстюк З. М., Перерва В. М., Єфіменко Т. А., Седлерова О. В., Шульга В. І. Флюїдодинамічні і неотектонічні основи та попередні результати апробації супутникової технології вивчення геологічної будови та перспектив нафтогазоносності шельфу 180

Перерва В. М., Левчик Е. И., Архипов А. И. Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов 187

Перерва В. М., Костина Т. И. Прогнозирование зон развития вторичных коллекторов по спутниковым данным 197

Перерва В. М., Архипов А. И., Бусел Г. Ф., Левчик Е. И., Рыбак Е. А., Осканьян Т. В. Состояние и пути совершенствования спутниковой технологии прогнозирования залежей нефти и газа 201

Осадчий В. Г., Приходько О. А., Грицик І. І. Геотермічний режим та оцінка перспектив нафтогазоносності північно-західної частини шельфу Чорного моря 206

Екологічні задачі

Мичак А. Г., Ліщенко Л. П., Теременко О. М., Кудряшов О. І., Щепець М. С. Вивчення екологічного стану урбанізованих та промислових територій України за багатозональними космічними знімками 209

SOLUTION OF TOPICAL PROBLEMS

Geological Problems

Azimov O. T. Complex geological aerospace investigation of the Chornobyl estrangement zone and the adjacent Korosten' pluton region in the search for locations suitable for deep deposition of radioactive waste 134

Pazynych V. H. and Pazynych N. V. Tectonic activity of sedimentary basins as a natural stage of their evolution 142

Krat V. N., Vul'fson L. D., Gunchenko V. A., Ogolenko V. S., Kudryashov A. I., and Avramenko V. G. The use of RSE data in the search for nitrogenous siliceous therms 143

Vorob'ev A. I., Kostyuchenko Yu. V., Lyal'ko V. I., Pererv V. M., and *Semenova S. G.* Aerospace and geophysical techniques used in combination in the oil and gas prospecting for the north-west Black Sea shelf 149

Podorvan V. N. and Fillipov Yu. F. Ground-based certification of the results of the remote sensing of hydrogeological objects 166

Filipovych V. Ye., Prykhod'ko V. L., and Tarangul D. O. Combined use of remote sensing and traditional techniques in the search for nonferrous ores 170

Pererva V. M. Lithospheric flow structures and their investigation by remote sensing techniques 174

Kotlyar O. Yu., Tovstyuk Z. M., Pererva V. M., Yefimenko T. A., Sedlerova O. V., and Shul'ga V. I. Fluidal and neotectonic factors in the formation of desired signal on space images in the studies of the geological structure of sea areas 180

Pererva V. M., Levchik E. I., and Arkhipov A. I. Some aspects of the mechanism of desired signal formation in the optical images of landscapes over hydrocarbon deposits 187

Pererva V. M. and Kostina T. I. Predicting the zones of development of secondary collectors from satellite data 197

Pererva V. M., Arkhipov A. I., Busel G. F., Levchik E. I., Rybak E. A., and Oskanyan T. V. Present state and avenues for the development of the satellite techniques for the prognostication of oil and gas deposits 201

Osadchyi V. G., Prykhod'ko O. A., and Hrytsyk I. I. Geothermal condition and outlook for oil and gas deposits in the north-west Black Sea shelf 206

Ecological Problems

Mychak A. H., Lischenko L. P., Teremenko O. M., Kudryashov O. I., and Schepets' M. S. Study of the ecological conditions of the urban and industrial areas in Ukraine with the use of multizonal space images 209

Мичак А. Г., Кудряшов О. І., Філіпович В. Є., Калінкін О. Г., Максимович Н. П. Використання аерокосмічного та газогеохімічного методів для вивчення загазованості приземного шару атмосфери територій нафтовидобутку в Передкарпатському прогині 218

Mychak A. H., Kudryashov O. I., Filipovych V. Ye., Kalinkin O. H., and Maksymovych N. P. Application of aerospace and gas-geochemical methods to study the gas pollution of the atmospheric surface layer in the oil production areas in the cis-Carpathian foredeep

Океанологічні задачі

Oceanological Problems

Коротаев Г. К., Суетин В. С., Суслин В. В., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Использование данных SeaWiFS для наблюдения Черного моря 221

Korotaev G. K., Suetin V. S., Suslin V. S., Korolev S. N., and Kucheryavyi A. A. Use of the SeaWiFS data for the Black Sea observations

Коротаев Г. К., Малиновский В. В., Пустовойтенко В. В., Радайкина Л. Н., Станичный С. В. Космический эксперимент «Мониторинг морских акваторий» 227

Korotaev G. K., Malinovskii V. V., Pustovoitenko V. V., Radaikina L. N., and Stanichnyi S. V. Sea area monitoring space experiment

Коротаев Г. К., Ли М. Е., Толкаченко Г. А. Подспутниковые наблюдения важнейших биооптических параметров в Черном море (новый подход) 231

Korotaev G. K., Li M. E., and Tolkachenko G. A. Subsatellite observations of the fundamental bio-optical parameters of the Black Sea (new approach)

Лісогосподарські задачі

Forestry Problems

Лялько В. И., Сахацкий А. И., Ходоровский А. Я., Азимов А. Т., Шпортюк З. М., Сибирцева О. Н., Буянова И. Я. Комплексирование многозональных космических снимков различного пространственного разрешения для повышения эффективности исследования лесных массивов (на примере Зоны отчуждения ЧАЭС и районов Сибири) 239

Lyal'ko V. I., Sakhatskii A. I., Khodorovskii A. Ya., Azimov A. T., Shportyuk Z. M., Sibirtseva O. N., and Buyanova I. Ya. Complex use of multizonal space images with various spatial resolutions with the aim of improving the efficiency of forest tract studies (by the example of the Chornobyl estrangement zone and Siberian regions)

Дубровський В. В., Пархісенко Я. В. Петроченко О. Ю., Потапенко Л. С., Рябоконенко О. Д., Штепа Ю. Н. Космічний моніторинг лісових пожеж за знімками NOAA 246

Dubrovs'kyi V. V., Parkhisenko Ya. V., Petrochenko O. Yu., Potapenko L. S., Ryabokonenko O. D., and Shtepa Yu. N. Space monitoring of forest fires with the use of NOAA images

Сільськогосподарські задачі

Agricultural Problems

Лялько В. И., Сахацкий А. И., Ходоровский А. Я., Жолобак Г. М., Буянова И. Я. Возможности прогнозирования урожайности зерновых культур на основе совместного использования многозональных космических снимков AVHRR, NOAA и «Landsat TM» (на примере Киевской области) 249

Lyal'ko V. I., Sakhatskii A. I., Khodorovskii A. Ya., Zholobak G. M., and Buyanova I. Ya. Possibilities for the prognostication of the productivity of cereals from multizonal AVHRR, NOAA, and Landsat TM images (by the example of the Kyiv Oblast)

Кобец Н. И., Войнов О. А. Применение методов дистанционного зондирования Земли для оценки состояния растительного покрова 255

Kobets N. I. and Voinov O. A. Application of RSE methods to the vegetative cover estimation

Яцевич С. Е., Иванов В. К., Яцевич Е. И., Шатохин А. В. Особенности применения многочастотной радиолокационной информации при дистанционных исследованиях аграрных территорий 263

Yatsevich S. E., Ivanov V. K., Yatsevich E. I., and Shatokhin A. V. On the use of multifrequency radar data in the remote sensing of agricultural areas

Кочубей С. М. Аппаратура и методы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне 271

Kochubei S. M. Equipment and methods for the remote sensing of vegetative cover in the optical range

Вирішення тематичних задач радіофізичними методами

Solution of Topical Problems by Radiophysics Methods

Белоброва М. В., Боев А. Г., Иванов В. К., Калмыков И. А., Матвеев А. Я., Разсказовский В. Б., Цымбал В. Н. Результаты многочастотного радиолокационного мониторинга неоднородностей волнения морской поверхности 275

Belobrova M. V., Boev A. G., Ivanov V. K., Kalmykov I. A., Matveev A. Ya., Razskazovskii V. B., and Tsymbal V. N. Results of the multifrequency radar monitoring of sea swell inhomogeneities

Тысик Б. Г., Курекин А. С., Ефимов В. Б., Гавриленко А. С., Калмыков И. А., Цымбал В. Н. Применение сигналов с фазовой манипуляцией для расширения полосы обзора космических радиолокаторов дистанционного зондирования Земли с синтезированием апертуры антенны 279

Tysik B. G., Kurekin A. S., Efimov V. B., Gavrilenko A. S., Kalmykov I. A., and Tsymbal V. N. The use of phase-shift signals for extending the space radar scanning pattern in the RSE with aperture synthesis

Сытник О. В., Кабанов А. В., Ефимов В. Б., Курекин А. С., Цымбал В. Н. Критерий качества радиолокационного изображения когерентных систем дистанционного зондирования 287

Sytnik O. V., Kabanov A. V., Efimov V. B., Kurekin A. S., and Tsymbal V. N. Quality criterion for the radar images produced by coherent remote sensing systems

Калмыков И. А., Боев А. Г., Ефимов В. Б. Определение количества свежевыпавших осадков по радиолокационным данным ИСЗ «Січ-1» 289

Kalmykov I. A., Boev A. G., and Efimov V. B. Determination of recent rainfall from the Sich 1 radar data

ПЕРЕДМОВА

За десятиріччя існування України як незалежної держави вже стало традиційним проведення всеукраїнських та міжнародних науково-прикладних форумів, присвячених обговоренню нових результатів з розробки теоретико-методичних питань аерокосмічних зйомок, тематичної інтерпретації одержаних матеріалів та їхнього практичного використання для вирішення актуальних задач оптимального природокористування.

Національною академією наук та Національним космічним агентством України за цей час організовано п'ять подібних форумів, як в рамках власне напряму дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), так і в рамках роботи секцій цього напряму при проведенні масштабніших за тематикою зібрань в галузі космічних досліджень.

Дистанційне зондування Землі в Україні розвивається досить динамічно. Основні академічні та відомчі організації, що працюють в цьому напрямі (Центр аерокосмічних досліджень Землі, Морський гідрофізичний інститут, Центр радіофізичного зондування Землі, Інститут космічних досліджень НАН і НКА України, КБ «Південне», ДП «Дніпрокосмос», Держцентр «Природа» НКА України, Інститут природного середовища і ресурсів Ради Національної безпеки і оборони та Український центр менеджменту землі і ресурсів), внесли істотний внесок в розробку та використання в практичній діяльності сучасних методів і матеріалів аерокосмічних зйомок.

Тут подаються доповіді співробітників цих колективів, а також представників інших українських та зарубіжних організацій (з Росії, ФРН, Білорусі та ін.) на міжнародній конференції «Аерокосмічні дослідження Землі: тенденції і перспективи», приуроченій до 10-річчя від дня заснування (25 травня 1992 року) Центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, який відповідними постановами НАН України та НКА України визначено головною організацією з науково-методичного супроводу робіт з ДЗЗ. У статтях висвітлено сучасний стан та перспективи досліджень з ДЗЗ не тільки в Україні, але й за кордоном. Перелік питань, що розглядаються, охоплює досить широкий інтервал від системного обгрунтування постановки досліджень та моделей формування спектральних сигналів земних утворень і методів тематичної інтерпретації даних ДЗЗ до розгляду сучасних супутникових технологій пошуків корисних копалин та оцінки екологічного стану територій і прогнозування врожайності зернових культур.

Сподіваємося, що ознайомлення з поданими матеріалами сприятиме розширенню уявлень про можливості аерокосмічних досліджень Землі і буде корисним в роботі як споживачам аерокосмічної інформації, так і дослідникам цього напряму науки.

В. І. ЛЯЛЬКО, член-кореспондент НАН України,
відповідальний редактор випуску

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 6—28

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (короткий історичний нарис)

В. І. Лялько, О. Д. Федоровський, В. М. Перерва, М. О. Попов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, м. Київ

Центр аерокосмічних досліджень Землі починає свій родовід з 1992 р., коли постановою Президії НАН України він був створений на базі структурних підрозділів Інституту геологічних наук та Київського інституту космоаерометодів. Центр є унікальною установою в Україні з комплексної розробки науково-методичних основ аерокосмічного зондування Землі для дослідження природних ресурсів і екологічного моніторингу. Він визначений НАНУ та НКАУ головною організацією з цього наукового напряму в Україні, на його базі створена Наукова рада НАНУ та кваліфікаційна спецрада із захисту докторських і кандидатських дисертацій по спеціальності «Дистанційні аерокосмічні дослідження».

Центр — перша українська установа в галузі ДЗЗ, що є членом Європейської асоціації лабораторій дистанційного зондування Землі. Він активно співпрацює з Національним космічним агентством, Міністерством з надзвичайних ситуацій, Мінекоресурсів, НАК «Нафтогаз України» та іншими українськими відомствами, а також з Європейським космічним агентством, космічними агентствами Росії, США, Німеччини та Франції, зокрема в рамках програми Міжнародної космічної станції. У Центрі розвиваються дослідження наукової школи «Енергомасообмін в геосистемах» та його вплив на спектральні властивості земних утворень. На базі цих досліджень виявлено нові механізми і процеси формування пошукових спектральних сигналів в різних ділянках електромагнітного спектру та створено ряд нових супутникових технологій, зокрема пошуків нафтогазових покладів, контролю впливу токсикантів на навколишнє середовище, оцінки пожежонебезпечності лісів, врожайності зернових та ін.

Вирішення різноманітних геологічних задач (пошуки нафтогазових покладів, термальних вод, тектонічних структур і т. п.) з використанням матеріалів аерокосмічних зйомок розпочалося в Інституті геологічних наук АН УРСР ще з 70-х років XX ст. Але організаційно спрямованими ці роботи стали лише в Центрі аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) Інституту геологічних наук Національної академії наук України, який був створений згідно з Постановою Президії Академії наук України № 150 від 20.05.92 р. на базі Київського науково-дослідного інституту космоаерометодів та підрозділів Інституту геологічних наук НАН України як самостійна юридична установа.

СТРУКТУРА ЦЕНТРУ

Директор: член-кореспондент НАН України, професор, доктор геол.-мін. наук, лауреат Державної премії України та премії ім. В. І. Вернадського НАН України, заслужений діяч науки і техніки України В. І. Лялько.

Заступники директора: канд. геол.-мін. наук В. М. Перерва, канд. техн. наук В. Г. Прокопенко. Вчений секретар: канд. геол.-мін. наук В. М. Крат.

На цей час загальна кількість працівників Центру становить понад сто співробітників, з них третина — наукові співробітники, серед яких два члени-кореспонденти НАН України, 30 кандидатів та докторів геологічних, фізико-математичних, технічних, географічних і біологічних наук. Організаційно ЦАКДЗ складається з трьох відділів: відділу досліджень енергомасообміну в геосистемах (чл.-кор. НАН України В. І. Лялько), відділу аерокосмогеологічних досліджень (канд. геол.-мін. наук В. М. Перерва) та відділу аерокосмогеоекологічних досліджень (чл.-кор. НАН України, доктор фіз.-

© В. І. ЛЯЛЬКО, О. Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ, В. М. ПЕРЕРВА, М. О. ПОПОВ, 2002

мат. наук, професор О. Д. Федоровський).

Центр спеціалізується на зборі та тематичній інтерпретації даних дистанційного зондування (ДЗЗ), обробці зображень земної поверхні та підготовці геоінформаційних продуктів. Досліджуються процеси енергомасообміну в геосистемах та їхній вплив на фізико-хімічні та біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів і дуже чутливі до дії різних природних та антропогенних факторів. Ці дослідження мають фундаментальний і водночас прикладний характер. Розробка моделей формування спектрального відгуку природних об'єктів, встановлення їхніх зв'язків з відповідними характеристиками навколишнього середовища і кількісна оцінка таких зв'язків є головним при використанні такого підходу. На базі цих спектральних моделей розробляються нові методи і технології збору та тематичної обробки даних ДЗЗ.

ОСНОВНІ НАПРЯМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

- Теоретико-методичні та практичні дослідження природних ресурсів, зокрема при пошуках, розвідці і розробці родовищ корисних копалин із застосуванням дистанційних методів аерокосмічного базування.
- Створення наукових основ аерокосмічного екологічного моніторингу території України з розробкою фізико-математичних моделей випромінювання та розсіювання в різних діапазонах спектру, обумовлені земними утвореннями (рослинність, грунти, вода, повітря).
- Теоретичне обгрунтування й експериментальна перевірка нової бортової апаратури та технологій дистанційного зондування земних утворень в різних діапазонах спектру для вирішення природоресурсних і екологічних задач.

ГОЛОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Оцінка та менеджмент природних ресурсів: Деталізація геологічної структури територій (вивчення активних екзогенних процесів, виявлення та локалізація активних розломних зон).
— Оцінка територій і шельфової зони з метою пошуку родовищ нафти та газу.
— Визначення вологості грунтів та рівня грунтових вод, пошук підземних водних резервуарів.
— Оцінка стану та картування лісових угідь.

2. Екологічний моніторинг навколишнього середовища:
— Оцінка морських акваторій та внутрішніх водоймищ (швидке виявлення розливів нафти і нафтопродуктів на водній поверхні, оцінка еколого-санітарного стану та якості води у водоймищах, виявлення промислових забруднень, контроль розподілу суспендованих речовин, зелених водоростей та ін.).
— Виявлення і моніторинг витоків з нафто-, газо-, водопроводів та систем гарячого водопостачання.
— Оперативний моніторинг паводків, підтоплень, заболочування, лісових пожеж та інших природних катастроф.
— Оцінка територій, забруднених важкими металами, радіонуклідами, пестицидами та іншими токсичними речовинами.
— Вивчення міських агломерацій (динаміки розвитку і забудови міста, антропогенного впливу промисловості на довкілля).

3. Застосування даних ДЗЗ у сільському господарстві:
— Інвентаризація посівів.
— Оцінка стану сільгоспугідь (фенологічні спостереження, забезпеченість посівів добривом, вологою, визначення біомаси та продуктивності).
— Прогнозування врожаю.
— Оцінка деяких параметрів стану грунтів.

4. Теоретичне обгрунтування і оцінка ефективності системи ДЗЗ на основі системного аналізу:
— Оцінки ефективності апаратурних комплексів ДЗЗ, що функціонують на борту космічного апарата.
— Формування складу комплексу апаратури, сукупність параметрів якого забезпечить виконання космічної програми ДЗЗ із найбільшою ймовірністю.
— Оцінки ефективності функціонування системи ДЗЗ (з урахуванням космічних апаратів і наземної інфраструктури) на основі методу системної динаміки й інформаційних технологій.

АВІАЦІЙНИЙ БОРТОВИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Комплекс знімальної апаратури, що створений і успішно використовується Центром, містить у собі такі апаратурні засоби дистанційного зондування:

— Скануючий інфрачервоний радіометр «Малахіт-М»: смуга огляду дорівнює $3.4H$, де H — висота польоту, енергетична роздільна здатність 0.1 K.

— Багатоканальний трасовий оптико-акустичний спектрометр «Кварц-3102»: кількість спектральних каналів — 100, діапазон $\lambda\lambda$ 400—800 нм.

— НВЧ-вологорівнемір, що працює на довжині хвилі 70 см, який має смугу огляду 20 м (при висоті польоту 150 м).

— Інтегральний гамма-радіометр.
— Відеокамера.

Цей комплекс використовується для вирішення різноманітних проблем вивчення навколишнього середовища:
— екологічний моніторинг довкілля;
— оперативний моніторинг повеней, підтоплень, лісових пожеж та інших природних катастроф;
— швидке виявлення нафти та нафтопродуктів на водній поверхні;
— оцінка стану трубопроводів та систем теплопостачання;
— пошуки корисних копалин;
— оцінка стану грунтів та рослинного покриву;
— оцінка стану сільгоспугідь та прогнозування врожаю.

Авіаційний комплекс знімальної апаратури вигідно відрізняється від інших бортових систем дистанційного зондування оптимальною комбінацією недорогих, але ефективних засобів дистанційного зондування в оптичному, інфрачервоному, гамма- та радіодіапазонах.

НАЙВАЖЛИВІШІ ДОСЯГНЕННЯ

Встановлено і систематизовано вплив токсикантів (радіонуклідів, важких металів, вуглеводневих газів, агрохімікатів) на спектральну яскравість рослин. Завдяки цьому розроблена технологія оцінки за космічними знімками екологічного стану територій та пошуків нафтогазових покладів.

Вперше в Україні створено атласи «Україна з Космосу» та «Космос — Україні» комп'ютерно дешифрованих космознімків українсько-російського космічного апарата «Океан-О», українського супутника «Січ-1» та ін., в яких показана можливість їхнього використання для вирішення актуальних для України природоресурсних і природоохоронних задач (пошуки нафтогазових покладів, контроль екологічного стану, зокрема поширення радіонуклідного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС тощо).

Розроблено концепцію імітаційної еколого-економічної моделі комплексної експлуатації водосховищ басейну р. Дніпро на базі методу системної динаміки та нових принципів обробки аерокосмічної інформації.

Створено нову супутникову технологію пошуків покладів вуглеводнів. Впровадження цієї технології в межах Дніпровсько-Донецької западини і Чорноморського шельфу дозволили виявити декілька десятків перспективних площ.

Розроблено методичні прийоми та комп'ютерні програми обробки аерокосмічної інформації у вузьких діапазонах електромагнітного спектру для оцінки екологічного стану території України, прогнозування врожайності зернових культур та пожежонебезпечності лісів.

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК У ВИРОБНИЦТВО

Впровадження розроблених у Центрі новітніх супутникових технологій пошуків покладів вуглеводнів дозволило виявити у межах Дніпровсько-Донецької западини та Чорноморського шельфу близько 20 площ, перспективних на нафту і газ. Рекомендації щодо постановки пошуково-розвідувальних робіт на виявлених площах передані ВАТ «Укрнафта» та НАК «Нафтогаз України».

Державній адміністрації м. Київ подані результати дешифрування космічних зображень з прогнозуванням розвитку сучасних екзогенних процесів у місті. Аналогічні прогнози передано держадміністрації м. Херсон.

Міністерству з надзвичайних ситуацій України надано карту пожежонебезпечності лісів Зони відчуження Чорнобильської АЕС.

ВАТ «Укрнафта» передані для впровадження карти «Джерела аномально високих концентрацій природного газу у приземному шарі атмосфери міст Борислав та Східниця».

ЦАКДЗ є унікальною організацією в Україні з розробки науково-методичних основ аерокосмічного зондування Землі для дослідження природних ресурсів та екологічного моніторингу. Його дослідження носять міждисциплінарний характер, вони не дублюють, а лише доповнюють та розширюють роботи цього напряму, що виконуються в інших організаціях переважно наземними методами. Визнанням високого професійного рейтингу Центру (сучасна зйомочна апаратура, програмно-комп'ютерні комплекси дешифрування та висококваліфіковані фахівці, що оволоділи технікою і технологією світового рівня) є визначення його головною організацією в Україні з цього актуального напряму (зокрема в рамках Державної космічної програми та згідно з Постановою Президії НАН України № 77 від 25.02.97 р.), створення на його базі Наукової ради Національної академії наук та Національного космічного агентства України і спеціалізованої вченої ради із захисту докторських і кандидатських дисертацій за спеціальністю «Дистанційні аерокосмічні дослідження». У Центрі плідно розвивається оригінальна наукова школа, що досліджує вплив енергомасообміну в геосистемах на спектральні характеристики земних покривів. Це дає можливість фундаментально обгрунтувати формування корисних сигналів для інтерпретації матеріалів аерокосмічного зондування. Високий про-

фесійний рейтинг ЦАКДЗ обумовлює хороші перспективи розвитку, оскільки це дає можливість оперативно переорієнтовувати колектив при вирішенні актуальних задач оптимального природокористування, що виконуються і будуть виконуватись ЦАКДЗ разом з різними українськими і зарубіжними відомствами. (Космічні агентства України, Німеччини, Франції, Міністерства з надзвичайних ситуацій і екоресурсів, НАК «Нафтогаз України», державні адміністрації Києва, Херсона, Житомира та ін.).

СТАНОВЛЕННЯ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВІДДІЛАХ ЦЕНТРУ

Нижче коротко викладено в історичному плані основні віхи становлення і розвитку аерокосмічних досліджень Землі в тих чотирьох колективах, на базі яких був створений Центр і які нині плідно співпрацюють в ньому, взаємно оцінюючи, доповнюючи та коригуючи свої дослідження з урахуванням високого рівня професійної специфіки знань кожного з колективів:

— відділу тепломасопереносу в земній корі АН України та партії дистанційних методів досліджень Дослідного підприємства цього ж Інституту (нині відділ енергомасообміну в геосистемах Центру);
— Київського інституту космоаерометодів, що до 1992 р. називався Київським відділом Інституту геології і розробки горючих копалин Міннафтогазпрому СРСР (нині відділ аерокосмічних досліджень в геології Центру);
— СКБ заводу «Арсенал» та Інституту гідромеханіки АН УРСР (нині відділ аерокосмічних досліджень в геоекології Центру);
— фахівців науково-учбових підрозділів авіаційної розвідки Міністерства оборони СРСР та України (нині працюють у відділах енергомасообміну в геосистемах та аерокосмічних досліджень в геології Центру).

Відділ енергомасообміну в геосистемах. Відділ енергомасообміну в геосистемах (до 1992 р. — тепломасопереносу в земній корі), який відокремився від Сектору гідрогеологічних проблем ІГН АН УРСР, створений у 1969 р. Завідувачем відділу був призначений кандидат геол.-мін. наук В. І. Лялько.

За час існування в складі Інституту геологічних наук АН УРСР (до 1992 р.) у відділі виконано значний обсяг теоретико-методичних та практичних досліджень. Нині у відділі працюють два доктори і 13 кандидатів наук, навчається чотири аспіранти.

Основні результати наукових досліджень:

— Моделювання процесів формування ресурсів підземних вод півдня України (1965 р., В. І. Лялько, Г. А. Шнейдерман).
— Обгрунтування захоронення токсичних промстоків у надра Дніпровсько-Донецької западини (вперше в Україні, 1967—1972 рр., В. І. Лялько, Ю. Ф. Філіпов).
— Розробка методів розрахунку тепло- і масопереносу в земній корі (вперше в СРСР, 1974 р., В. І. Лялько).
— Дослідження переносу тепла і речовин в земній корі з урахуванням процесів фізико-хімічної кінетики (вперше в СРСР, 1978 р., В. І. Лялько, М. М. Митник, Є. В. Добровольський).
— Розробка критеріїв геотермічних пошуків корисних копалин (1979 р., В. І. Лялько, М. М. Митник, Л. Д. Вульфсон, З. М. Шпортюк).
— Розробка геотермічних методів досліджень в гідрогеології (згідно з завданням ДКНТ при РМ СРСР, 1979 р., В. І. Лялько, М. М. Митник, Л. Д. Вульфсон та ін.).
— Моделювання гідрогеологічних умов охорони підземних вод у басейні р. Сів. Донець (згідно з завданням РМ УРСР, 1973—1980 рр., В. І. Лялько, Ю. С. Бут, Ю. Ф. Філіпов, Г. А. Шнейдерман).
— Розробка методичних і експериментальних основ гідрогеотермії (1983 р., В. І. Лялько, М. М. Митник та ін.).
— Космічна інформація у вирішенні геологічних задач (1983 р., В. І. Лялько, В. Г. Трифонов, А. В. Пейве, А. Л. Яншин та ін.).
— Розробка фізико-хімічних основ метаморфогенного рудоутворення (1985 р., В. І. Лялько, М. М. Митник, Я. М. Бєлєвцев, В. Б. Коваль та ін.).
— Обгрунтування процесів тепломасопереносу в літосфері (1985 р., В. І. Лялько).
— Розробка методів геохімічного моделювання та прогнозування в гідрогеології (1988 р., В. І. Лялько, С. Р. Крайнов, Є. В. Добровольський та ін.).
— Дослідження водообміну в гідрогеологічних структурах України в природних умовах (1988—1989 рр., В. М. Шестопалов, В. І. Лялько, М. С. Огняник та ін.).
— Розробка методики вивчення глибинної геологічної будови та нафтогазоносності Дніпровсько-Донецької западини (1989 р., В. К. Гавриш, В. Б. Сологуб, В. І. Лялько, А. Й. Недошовенко та ін.).
— Обгрунтування застосування аерокосмічних методів в геоекології (1992 р., В. І. Лялько, Л. Д. Вульфсон, В. Ю. Жарий та ін.).
— Розробка довідника з геоекології України —

стосовно залучення методів ДЗЗ (1993 р., Є. Ф. Шнюков, В. І. Лялько та ін.).
— Обгрунтування нових методів в аерокосмічному землезнавстві (1999 р., В. І. Лялько, Ю. В. Костюченко, О. Д. Федоровський, О. І. Сахацький, А. Я. Ходоровський, О. Т. Азімов, Л. Д. Вульфсон, О. М. Сибірцева, З. М. Шпортюк, В. Ю. Жарий та ін.).

Базуючись на вказаних теоретико-методичних дослідженнях і досягненнях, відділом виконано значний обсяг впроваджень цих результатів у вигляді договірних робіт з виробничими організаціями, основні з яких за цей період:
— Розрахунки запасів термальних вод України (Дніпровсько-Донецька западина, Крим, Закарпаття).
— Розробка заходів з охорони підземних вод у басейні р. Сів. Донець, Північно-Кримському промрайоні та ін.
— Оцінка геоекологічного стану за допомогою аерокосмічних методів в межах міських агломерацій Києва, Херсона, Дніпропетровська, Запоріжжя, Житомира та ін.
— Надання практичних рекомендацій з пошуку перспективних нафтогазових площ в Дніпровсько-Донецькій западині, на шельфі Азовського і Чорного морів, в колишніх республіках Середньої Азії (Туркменистан, Таджикистан, Узбекистан).
— Надання практичних рекомендацій по визначенню норм зрошення сільськогосподарських культур та ліквідації негативних явищ (заболочування, засолення) на зрошувальних масивах півдня України.
— Розрахунки запасів парогідротерм на Камчатці (для Мутновської геотермальної станції та ін.), визначення водоносних горизонтів в умовах вічної мерзлоти (Західно-Сибірська западина) та запасів підземних термомінеральних вод в гірських районах Таджикистану.
— Прогнозування пожежонебезпечності та фітосанітарного стану лісів Зони відчуження Чорнобильської АЕС.

Впровадження наукових розробок проведено в організаціях Міністерств геології СРСР і УРСР, Міністерств надзвичайних ситуацій та екоресурсів України, НАК «Нафтогаз України», державних адміністраціях міст Києва, Херсона тощо.

Для виконання вказаних досліджень запрошувались до співпраці висококласні спеціалісти різних напрямів. Поступово сформувався колектив однодумців. У відділі почали працювати фізики, хіміки, математики, радіофізики, теплофізики, гідрогеологи, геологи, біологи. Енергомасоперенос у геосистемах — це інтердисциплінарний напрям, який вимагав участі різнопланових фахівців, кожен з яких мав вирішувати питання на високому професійному рівні. Цей напрям вийшов за межі тільки гідрогеологічної науки і став перспективним для розвитку на сучасній фізико-математичній основі всього комплексу геологічних наук. Адже, як висловився ще в 1972 р. академік О. П. Виноградов (на той час — віце-президент АН СРСР і директор Інституту геохімії АН СРСР), «...мы находимся накануне периода химической технологии Земли, и проблема тепломассопереноса должна в геологии рассматриваться в таком же ракурсе, как она рассматривается в химической технологии». Виходячи з цієї теорії і розглядаючи на земній поверхні сигнали хімічних, теплових, водних, щільнісних аномалій як початкові і граничні умови загальних рівнянь енергомасообміну, ми запропонували цей підхід використати і в такому нібито далекому від нас напрямі, як аерокосмічні, або дистанційні, дослідження Землі. У різних діапазонах: у видимому мультиспектральному діапазоні — на хвилях різної довжини, у тепловому діапазоні, або в радіодіапазоні. Наш підхід та його експериментальне підтвердження за допомогою наземних й інфрачервоних дистанційних зйомок показали, що ми можемо створювати математичні моделі формування сигналу і розв'язувати такі задачі, як пошуки корисних копалин (нафти, газу — по зйомках у видимому і тепловому діапазонах), оцінка вологості і глибини залягання грунтових вод — по зйомках у радіодіапазоні, оцінка забруднення території токсикантами, можливість вирішувати екологічні проблеми, пошуки родовищ кольорових і рідкісних металів тощо — по мультиспектральних і теплових зйомках. Певним визнанням наших розробок, які не мали на той час світових аналогів, стало видання англійською мовою у 1981 р. на замовлення Національного наукового фонду США монографії В. І. Лялька «Розрахунок тепло- і масопереносу в земній корі».

1985 р. була відзначена Премією ім. В. І. Вернадського АН УРСР монографія В. І. Лялька «Тепломасоперенос в літосфері». Подібний системний підхід у дослідженнях на базі уявлень теорії енергомасообміну дозволив зайняти досить непогані на той час наукові позиції у СРСР. На основі відділу в Інституті геологічних наук була створена Наукова рада АН УРСР з дистанційного зондування Землі. Колектив став визнаною у Союзі організацією в галузі аерокосмічних досліджень Землі. Вийшло друком чимало книг. Співробітники брали участь у спільних проектах з всесоюзними організаціями, а також із зарубіжними фірмами у рамках програми «Інтеркосмос». Тому, коли розпався Радянський Союз, у травні 1992 року саме на базі цього відділу при Інституті геологічних наук АН України було створено Центр аерокосмічних досліджень Землі

ІГН АН України. Його директором став В. І. Лялько, якого цього ж року було обрано членом-кореспондентом АН України. Відтоді співробітники Центру брали найактивнішу творчу участь і у першій, і у другій Національних космічних програмах України. Сьогодні Центр є провідною організацією Національної академії наук та Національного космічного агентства України, яка розробляє третю космічну програму України у розділі «Дистанційне зондування Землі». Співробітники Центру виборали понад півдюжини грантів (Міжнародного наукового фонду, космічних агентств Європи, Німеччини, Франції та ін.). Освоїли абсолютно нові космічні технології (наприклад, застосування радарної інтерферометрії для оцінки сучасних рухів земної поверхні тощо).

Усі ці досягнення були б неможливими без злагодженої роботи колективу талановитих професіоналів різних спеціальностей, що сформували кістяк цього відділу, а в подальшому — Центру аерокосмічних досліджень Землі: теплофізика Марклена Мироновича Митника, який зробив неоціненний внесок у розвиток розрахункових гідрогеотермічних методів (на превеликий жаль, передчасно пішов від нас); фізика-хіміка Євгена Вікторовича Добровольського, котрий успішно розробляв динамічні і кінетичні методи в гідрогеохімії (нині працює за фахом в Канаді); математика Зіновії Михайлівни Шпортюк, яка створила нові програмні продукти для комп'ютерного розв'язання прямих і обернених гідрогеотермічних задач і обробки матеріалів мультиспектральних аерокосмічних зйомок для розв'язання тематичних задач; радіофізика Леоніда Давидовича Вульфсона, котрий сконструював оригінальну апаратуру і розробив методики моделювання гідрогеотермічних процесів, оцінки вологовмісту грунтів і глибин залягання грунтових вод внаслідок активного зондування земних утворень у радіохвильовому діапазоні. Етапи і результати наших багаторічних досліджень наведені в таблиці. До нас прийшла нова наукова поросль, молоді спеціалісти — наші «діти» в науці. Вони мають досить непоганий багаж знань. Прагнуть знати ще більше, самовдосконалюються, стажуються, їздять за кордон для обміну досвідом. Це — старші наукові співробітники: талановитий молодий вчений Ю. В. Костюченко, кандидат фізико-математичних наук; О. І. Сахацький, кандидат геолого-мінералогічних наук, вдумливий і скромний фахівець найвищого класу та багатьох інших. Втішно, що передається

Основні розробки у відділі тепломасопереносу в земній корі ІГН АН УРСР (з 1992 р. — відділ енергомасообміну в геосистемах ЦАКДЗ) з нових наукових напрямків

Хронологія, роки	Найменування розробки	Автори
1965—1972	Дослідження тепло- і масопереносу в земній корі на основі складання комп'ютерних програм стосовно розрахунків експлуатаційних запасів термальних і мінеральних вод, захоронення промстоків у надра, палеореконструкції процесів рудоутворення, обгрунтування гідрогеохімічних і гідро-геотермічних пошуків корисних копалин з урахуванням кінетики взаємодії в системі «розчин—порода». За цими матеріалами В. І. Ляльком у 1972 р. захищена докторська дисертація «Дослідження особливостей тепло- і масопереносу в підземних водах південного заходу Російської платформи і суміжних регіонів» і видана відповідна монографія (1974р.), перевидана в США (1981 р.)	В. І. Лялько, М. М. Митник, Ю. Ф. Філіпов, Є. В. Добровольський, З. М. Шпортюк, В. Г. Ткаченко
1973—1991	Розробка теоретико-методичних основ формування геотермічних, геохімічних, спектральних пошукових сигналів у приповерхневих шарах і на земній поверхні на основі уявлень теорії енергомасообміну в геосистемах. Складання комп'ютерних програм рішення прямих і обернених гідрогеотермічних задач стосовно пошуків нафтогазових покладів. Експериментальні наземні й авіаційні теплові, мультиспектральні і радіохвильові зйомки для рішення геологічних і екологічних задач. За цими роботами видано 12 монографій	В. І. Лялько, М. М. Митник, Є. В. Добровольський, Л. Д. Вульфсон, О. І. Сахацький, З. М. Шпортюк
1992 — до цього часу	Теоретико-методичне обгрунтування і практичне випробування у виробничих умовах нових методів в аерокосмічному землезнавстві (радарна інтерферометрія, гіперспектрометрія та ін.) стосовно вирішення актуальних для України природоресурсних і природоохоронних задач (пошуки нафтогазових покладів, контроль і прогнозування врожайності сільськогосподарських культур, пожежонебезпечності лісів, підтоплення територій, паводків, екологічного стану територій і акваторій та ін.). Впровадження зазначених розробок у практику відбувалось в організаціях Міністерств надзвичайних ситуацій, агропрому, екоресурсів, нафтогазпрому та ін. Ці роботи неодноразово доповідалися на вітчизняних і міжнародних форумах, описані в п'яти монографіях і збірниках (у тому числі в Атласах тематично дешифрованих космознімків «Україна з Космосу» — 1997; 1999 рр. і «Космос—Україні» — 2001 р.). Вони двічі (1997 р. і 1999 р.) заслуховувалися на засіданні Президії НАН України, де одержали високу оцінку. Їхнє виконання дозволило виграти гранти Міжнародного наукового фонду і космічних агентств України, Німеччини, Франції і Європейського космічного агентства	В. І. Лялько, Л. Д. Вульфсон, О. І. Сахацький, В. Ю. Жарий, Ю. В. Костюченко, А. Я. Ходоровський, З. М. Шпортюк

естафета гідній молоді, радісно, що те, що зроблено, — визнається. І варто докласти ще більше зусиль, аби молоді спеціалісти, вчорашні студенти, які вливаються в колектив, ще більше збагатили б цей напрям своїми сучасними знаннями.

Відділ аерокосмічних досліджень в геології. Отримані перші космічні зображення земної поверхні продемонстрували великі можливості використання космічної інформації у практиці геологорозвідувальних робіт на нафту і газ. Це послугувало підставою Міністерству нафтової і газової промисловості СРСР для створення у 1972 р. у своїх структурних підрозділах аерокосмогеологічної служби у вигляді груп (геофізичні трести) і лабораторій (регіональні науково-дослідні і проектні інститути нафти). Одна з таких лабораторій 25.12.72 р. була створена в Українському науково-дослідному інституті проектування нафтовидобутку (УкрНДІПНД). У 1976 р. ця лабораторія була реорганізована у Київський відділ Інституту геології і розробки горючих копалин Міннафтогазпрому і АН СРСР.

Задачами відділу були розробка наукових основ і апробація методики аерокосмогеологічних досліджень при нафтогазопошукових роботах в усіх нафтогазоносних провінціях СРСР, які різняться ландшафтними умовами і геологічною будовою, навчання на курсах підвищення кваліфікації при відділі спеціалістів виробничих груп і лабораторій галузевих інститутів, що проводять аерокосмогеологічні дослідження, апробація і запровадження в галузі нової знімальної фотограмметричної і фотографічної апаратури, організація обміну закордонним і вітчизняним досвідом аерокосмогеологічних досліджень та ін. Завідувачами відділу були: 1976—1982 рр. к.г.-м.н. В. І. Грідін, 1982—1986 рр. к.г.-м.н. Г. В. Чернявський, 1987—1991 рр. к.г.-м.н. В. М. Перерва. Науковий потенціал відділу складали: к.г.-м.н. М. Г. Распопова, к.г.-м.н. Д. М. Данилевська, к.т.н. В. С. Готинян, к.г.-м.н. З. М. Товстюк, к.г.-м.н. В. Т. Воловик, к.г.-м.н. Б. М. Гущин, к.г.-м.н. Г. Ф. Бусел, к.т.н. М. О. Тепляков, к.г.-м.н. В. М. Чернін, к.г.-м.н. Г. І. Балеста, к.г.-м.н. В. М. Панасенко, к.г.-м.н. В. П. Полканов та ін.

В цей період відділ успішно виконує поставлені завдання. У 1987 р. видаються «Временные методические рекомендации по аэрокосмогеологическим исследованиям и использованию их результатов при нефтегазопоисковых работах», у цьому ж році видається «Тектоническая карта нефтегазоносных областей юго-запада СССР» (с использованием материалов космических съемок), масштаб 1:500000 (гл. редактор Н. А. Крылов), відзначена Державною премією України. У колективі укладачів співробітники відділу: к.г.-м.н. М. Г. Распопова (заст. головного редактора) к.г.-м.н. Г. В. Чернявський (заст.головного редактора), картографи: І. І. Кашуба, А. П. Оленович, В. Ф. Мясникова.

Йде успішне запровадження аерокосмічних методів в Україні (Карпати, Дніпровсько-Донецька западина), за що у 1984 р. З. М. Товстюк нагороджена срібною, а Д. О. Тарангул — бронзовою медалями ВДНГ СРСР. З використанням аерокосмічних даних відкриті Озерянське, Світличне, Білоусівське, Чижевське, Василівське, Волошківське, Хухрянсько-Чернеччинське (Дніпровсько-Донецька западина) і було уточнено геологічну будову і межі покладів Ново-Східницького, Ново-Сумницького, Микуличинського (Карпати) родовищ нафти. Аерокосмогеологічні дослідження виконувались під керівництвом Д. О. Тарангула, А. Г. Мичака.

У 1983 р. співробітники відділу З. М. Товстюк, В. Т. Воловик нагороджені медаллю «За трудовую доблесть». За запровадження аерокосмічних методів у Волго-Уральській нафтогазоносній провінції М. О. Тепляков і Г. Ф. Бусел відзначені бронзовою медаллю ВДНГ СРСР.

Відділ проводить союзні наради з обміну передовим досвідом аерокосмогеологічних досліджень, видає збірники наукових праць, очолює роботи з підсупутникових експерементів, керує полігонними дослідженнями і запроваджує у практику нафтогазопошукових робіт тепловізор «Вулкан», багатозональний аерознімальний комплекс МСК-4, проводить дослідження з розробки нових методів фотолабораторної і оптико-електронної тематичної обробки аерокосмозображень, удосконалює методику структурно-геоморфологічних досліджень як важливого елементу процесу аерокосмогеологічних робіт.

До кінця 1987 р. методика аерокосмогеологічних досліджень була розроблена і запроваджена у виробничому режимі практично по усіх нафтогазоносних провінціях СРСР. На основі використання аерокосмічної інформації успішно вирішуються завдання прогнозу покладів ВВ, вивчення блокових полів і неотектонічної активності нафтогазоносних територій, геоекології та ін.

Аерокосмічні методи міцно увійшли в практику геологорозвідувальних робіт Міннафтогазпрому СРСР, забезпечуючи його геологічною і економічною ефективністю. Найбільш широко і ефективно аерокосмічні методи застосовуються у цей період у Дніпровсько-Припгятській, Волго-Уральській, Західно-Сибірській, Тімано-Печорській НГП, районах Передкавказзя, Закавказзя, Карпат.

З 1988 р. відділ з ініціативи і під науковим керівництвом к.г.-м.н. В. М. Перерви розпочав розробку методу прямого прогнозування покладів вуглеводнів на основі наземного і дистанційного

вивчення спектрального поля ландшафтів, який отримав назву супутникової технології прогнозу покладів нафти і газу на суші. Піонери-розробники методу — к.т.н. М. О. Тепляков, к.г.-м.н. Г. Ф. Бусел. У подальшому великий внесок у розробку методу зробили О. І. Архипов, к.б.н. О. І. Левчик, О. В. Гонтаренко, Т. В. Осканьян, О. А. Рибак. Відділ розробив і виготовив фотометри ПФ-08, КФ-08 для виконання наземних спектрометричних досліджень.

З 1993 р. відділ розпочав розробку супутникової технології прогнозу покладів ВВ на шельфі. Наукове керівництво досліджень здійснюють член-кореспондент НАН України В. І. Лялько, к.г.-м.н. В. М. Перерва.

З 1995 р. відділ розробляє супутникову технологію вивчення зон розвитку високопроникних колекторів (розробник к.г.-м.н. В. М. Перерва).

Основні результати досліджень:

1) фундаментальні:

— подальше вивчення теорії геоіндикаційних досліджень в ДДЗ дозволило перейти від прогнозу покладів ВВ за структурним критерієм (прогноз пасток), який широко використовувався до 1988 року, до прогнозу за критерієм продуктивності пасток, що означає перехід на більш високий рівень прогнозу;

— розроблено основи моделі геофлюїдодинамічних структур літосфери (ГФДС), сформованих у вузлах перетину зон напружено-деформованого стану літосфери, які мають космогенну природу і планетарний характер розвитку, їхнє картування можливе лише аерокосмічними методами. Встановлено при цьому головну роль ГФДС у процесах переформування покладів ВВ, соляного і глиняного діапіризму, формуванні зон новітньої тріщинуватості, діяльності грязьових і магматичних вулканів, вертикальної міграції пластових і глибинних флюїдів, формуванні рудних родовищ, алмазів, визначено роль ГФДС у формуванні сучасних ландшафтів. У межах акваторій з ГФДС пов'язані прояви газових струменів і явища апвелінгу, встановлено велику роль ГФДС у формуванні геоекологічної ситуації. Вчення про ГФДС складає основу супутникових технологій прогнозу покладів ВВ на суші і шельфі, а також прогнозу зон розвитку вторинних високоємних колекторів. (к.г.-м.н. В. М. Перерва);

— визначені геолого-геофізичні і біохімічні фактори формування корисного сигналу на космозображеннях над покладами ВВ, які складають основу супутникової технології прогнозу покладів нафти і газу (к.г.-м.н. В. М. Перерва, н.с. О. І. Архипов, к.т.н. М. О. Тепляков, к.б.н. О. І. Левчик, к.г.-м.н. Г. Ф. Бусел);

— розроблено наукові основи супутникової технології прогнозу покладів вуглеводнів і вивченні розривних структур на шельфі. Наукову основу технології складає вчення про геофлюїдодинамічні структури літосфери.

2) прикладні:

— вперше у вітчизняній практиці розроблено супутникову технологію прогнозування покладів нафти і газу на суші. Технологія апробована у виробничому режимі у межах Західно-Сибірської, Волго-Уральської і Дніпровсько-Припгятської нафтогазоносних провінціях (компанія «Лукойл-Укрнафтогаз», АТ «Татнафта», ВАТ «Укрнафта», ДК «Укргазвидобування», організації Мінекоресурсів України). Підтверджуваність результатів прогнозу, затверджених актами замовника, склала 0.80. Технологія характеризується високою оперативністю і низькими витратами (к.г.-м.н. В. М. Перерва, н.с. О. І. Архипов, к.т.н. М. О. Тепляков, к.б.н. О. І. Левчик, к.г.-м.н. Г. Ф. Бусел);

— вперше у вітчизняній і закордонній практиці розроблено супутникову технологію вивчення зон розвитку вторинних колекторів, які характеризуються високими фільтраційно-ємнісними властивостями. Технологія апробована у виробничому режимі на родовищах Тюменської нафтової компанії, НАК «Нафтогаз України». Підтверджуваність результатів досліджень склала 0.82. Технологія дозволяє розташувати експлуатаційні свердловини в найсприятливіших геодинамічних умовах, що забезпечує отримання високодебітних припливів пластового флюїду, підвищує у 2-3 рази економічну ефективність розробки родовищ (к.г.-м.н. В. М. Перерва);

— розроблено основи супутникової технології прогнозу покладів вуглеводнів на шельфі. Основу технології складає вчення про геофлюїдодинамічні структури літосфери.

— НАК «Нафтогаз України» подані рекомендації на постановку пошуково-розвідувального буріння у межах Азовського і Північно-західного шельфу Чорного морів, а також надано оцінку продуктивності обгєктів по 42 площах Дніпровсько-Донецької западини (к.г.-м.н. В. М. Перерва, н.с. О. І. Архипов, к.т.н. М. О. Тепляков, к.б.н. О. І. Левчик, к.г.-м.н. Г. Ф. Бусел);

— в Азово-Чорноморському регіоні встановлено просторовий звгязок покладів ВВ з ГФДС, який свідчить про вторинну природу покладів ВВ. Звгязок носить закономірний характер і може бути використаний як нафтогазопошуковий критерій як в Азово-Чорноморському регіоні, так і в Дніпровсько-Донецькій западині, Передкарпатському прогині та інших нафтогазоносних територіях;

— в Азовському морі на основі вчення про геофлюїдодинамічні структури і уявлень про вторинну природу промислових скупчень ВВ за даними аерокосмогеологічних досліджень виявлено велику

серію ГФДС, перспективних на виявлення промислових скупчень ВВ. Два роки по тому в зоні впливу в одній з них виявлені Північно-Казантипське і Східно-Казантипське промислові скупчення ВВ. Цей факт підтверджує правомірність використання зв'язку покладів ВВ з ГФДС як нафтопошукового критерію (к.г.-м.н. В. М. Перерва).

Розробка зазначених супутникових технологій прогнозу покладів ВВ на шельфі і суші є основним предметом досліджень відділу на даний момент і направлена на вирішення паливно-енергетичної проблеми України за рахунок розвитку власної мінерально-сировинної бази.

Перспективи розвитку досліджень у відділі пов'язані з підвищенням рівня завдань, які вирішуються за такими напрямками:

— подальше вивчення механізму формування корисного сигналу на аерокосмозображеннях над родовищами корисних копалин на основі вчення про геофлюїдодинамічні структури літосфери і пов'язані з ними процеси;

— удосконалення супутникової технології прогнозу покладів ВВ на суші, спрямоване на підвищення ролі супутникової інформації і зниження ролі наземних досліджень, з тенденцією повного виключення останніх з технології прогнозу. Це дозволить значно скоротити строки досліджень на перспективних площах (з 12 місяців до 1—2 місяців), підвищити їхню оперативність, виключити фактор сезонності в дослідженнях;

— до 2005 р. закінчити формування цілісної супутникової технології прогнозу покладів ВВ на шельфі на основі комплексного використання інформації про флюїдодинамічні, неотектонічні, гідрофізичні і геоморфологічні процеси;

— розпочати розробку супутникових технологій прогнозу родовищ рудних корисних копалин, алмазів, термальних вод;

— підвищити рівень комп'ютеризації супутникової технології прогнозу зон розвитку вторинних колекторів, які характеризуються високими фільтраційно-ємнісними властивостями;

— продовжити розвиток вчення про геофлюїдодинамічні структури літосфери, розширити масштаби досліджень від регіонального до загальнопланетарного рівнів і визначити роль вертикальних зон напружено-деформованого стану літосфери і ГФДС у формуванні зон спредингу, трансформних розломів, меж літосферних плит та інше.

Відділ аерокосмічних досліджень в геоекології. Відділ було створено в 1992 р. У відділі працюють один доктор і вісім кандидатів наук, навчаються три аспіранти.

Науковий напрям відділу: розробка наукових основ і методів дистанційних досліджень гідроекологічних процесів для вирішення водоохоронних і водогосподарських завдань з використанням аерокосмічної інформації та системного підходу.

Група наукових співробітників відділу — член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський, кандидати технічних наук В. Г. Якимчук, І. П. Пахомов, О. С. Власенко, науковий співробітник Л. М. Друченко, інженер Л. І. Кепкал — раніше працювали в центральному конструкторському бюро (ЦКБ) заводу «Арсенал», де одержали вагомий досвід в проектуванні та дослідженні авіаційних систем дистанційного зондування Землі. Висока кваліфікація спеціалістів дозволила групі з перших днів роботи в ЦАКДЗ розпочати дослідження у напрямку розробки наукових основ, методології оцінки й оптимізації систем аерокосмічного ДЗЗ в оптичному діапазоні спектру для вирішення природоресурсних, господарських і екологічних задач.

Вперше в Україні авіаційну апаратуру ДЗЗ почали розробляти в кінці шістдесятих років у ЦКБ заводу «Арсенал». У 1958 році Державний оптичний інститут (ДОІ) ім. С. І. Вавілова (м. Ленінград) передав заводу «Арсенал» результати досліджень експериментального макета скануючого тепловізора «Уржум» для створення на його базі авіаційних приладів ДЗЗ. Для забезпечення цих робіт у ЦКБ була організована лабораторія інфрачервоної техніки (1960 р.), а згодом відділ авіаційних дистанційних систем (1964 р.). Керівником цих підрозділів і головним конструктором було призначено О. Д. Федоровського, а науковим керівником М. М. Мірошникова (згодом директор ДОІ, Президент оптичного товариства Росії, академік РАН). У цей період були розроблені і виготовлені перші зразки авіаційних оптико-електронних скануючих тепловізорів: вертолітний варіант «Сура», а пізніше літаковий тепловізор «Гагара». Апаратура призначалася для зондування морських акваторій, виявлення і розпізнавання в нічний час кораблів за їхнім власним випромінюванням в інфрачервоній області спектру. У 1964—1966 р. дослідні зразки успішно пройшли випробування, за результатами яких було прийняте рішення про випуск серійної партії апаратури. Виготовлені серійні зразки були прийняті на дослідну експлуатацію в частинах військово-морської авіації. У 1966 р. відділ був значно розширений і перетворений у спеціальне конструкторське бюро (СКБ-2) на чолі з доктором фіз.-мат. наук О. Д. Федоровським. Його заступниками в різний період були Ю. П. Савченко, Л. А. Рипневська, В. М. Рачинський, А. О. Борисюк, В. К. Радін. Одним із відділів СКБ керував нині старший науковий співробітник ЦАКДЗ к.т.н. І. П. Пахомов, керівником групи СКБ був нині старший науковий співробітник ЦАКДЗ к.т.н. В. Г. Якимчук.

У вісімдесяті роки були створені більш досконалі універсальні авіаційні тепловізійні системи ДЗЗ: «Пінгвін», «Спостерігач», ІЧ-пеленгатор «Полюс», спектрофотометр «Риф» і космічна інфрачервона скануюча система ДЗЗ для ШСЗ «Діамант».

Зображення морської поверхні в інфрачервоній області спектра (8—14 мкм), одержане за допомогою тепловізора, наведено на рисунку. На знімку акваторії чітко видно два кораблі і їхні кільватерні сліди.

Створена на заводі «Арсенал» авіаційна тепловізійна апаратура ДЗЗ протягом 1965—1980 рр. використовувалася при проведенні комплексних морських випробувань у різних районах Світового океану. У результаті проведених під керівництвом О. Д. Федоровського досліджень в акваторіях Чорного, Баренцового, Середземного і Японського морів, а також Тихого океану, був отриманий унікальний науковий матеріал, що дозволив виявити нові гідрофізичні явища, що відбуваються на вільній морській поверхні — на межі взаємодії «вода—атмосфера». Вперше експериментально було встановлено і всебічно досліджено умови виникнення на морській поверхні холодного «скін—прошарку». Це явище було використано як інформативна ознака при створенні авіаційних дистанційних систем картографування морської поверхні в інфрачервоній області спектру. У цей же період на основі системного підходу були розроблені наукові основи, алгоритм і програмне забезпечення для БЕСМ-6, які дозволили оцінювати ефективність і моделювати параметри створюваних систем ДЗЗ. Результати цих досліджень були викладені в монографії «Физико-технические основы построения высокочувствительных тепловизоров» (М. М. Мирошников, Е. М. Минеев, А. Д. Федоровський, 1978) і в роботі «Системный подход при проектировании сложной оптической аппаратуры» (Федоровский А. Д. // Оптико-механическая промышленность.—1980.—№ 3).

На початку дев'яностих років у відділі фізичної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України під керівництвом члена-кореспондента НАН України О. Д. Федоровського були проведені роботи з використання методів ДЗЗ для вирішення водоохоронних і водогосподарчих задач. Для цього був використаний авіаційний тепловізор «Вулкан» і спеціально розроблений і виготовлений у СКТБ інституту двоканальний радіометр із робочими спектральними діапазонами 3—5 і 8—13 мкм. У процесі спільних лабораторних і натурних дистанційних досліджень було встановлено взаємозв'язок між просторовими характеристиками температурних полів на морській поверхні та гідродинамічними явищами, що відбуваються на глибинних горизонтах за різноманітних гідрологічних умов. У результаті було висунуто й обгрунтовано наукову гіпотезу про визначальну роль внутрішніх хвиль у зміні температурних аномалій на вільній морській поверхні. Ці дослідження послужили основою для видання монографій: «Оптические методы в гидромеханике» (А. Д. Федоровский, 1984) і «Процессы переноса в системах газ-жидкость» (А. Д. Федоровский, Е. И. Никифорович, М. А. Приходько, 1988). Фотографія тепловізора «Вулкан» і отримане за його допомогою зображення ставка-охолоджувача Чорнобильської АЕС наведені нижче.

На знімку водойми відтворюється просторовий розподіл температури по поверхні водойми.

В міру прямування від каналізованого скидання до водозабору температура води, що циркулює, за рахунок природного охолодження поступово знижується і зображення водяної поверхні на знімку темнішає. Теплова карта водойми-охолоджувача дозволяє, з одного боку, провести оцінку ефективності роботи водойми, з іншого боку — оцінити енергетичну потужність АЕС і одержати конкретні дані для розрахунків і проектування подібних об'єктів у майбутньому.

Отриманий у СКБ заводу «Арсенал» і Інституті гідромеханіки НАН України досвід робіт із створення і застосування методів і систем ДЗЗ знайшов свій розвиток у відділі аерокосмічних досліджень в геоекології ЦАКДЗ. Проведені у відділі під керівництвом О. Д. Федоровського дослідження спрямовані на створення наукових основ і методик використання космічної інформації для вирішення водогосподарчих і гідроекологічних задач, розробку методології структурно-текстурного аналізу космічних зображень ландшафтних комплексів, створенню на основі системного підходу методик і комп'ютерних програм оцінки ефективності космічних апаратурних комплексів природоресурсних супутників Землі.

Основні результати наукових досліджень відділу:

На основі системних методів, які забезпечують тематичну інтерпретацію аерокосмічних зображень водно-ландшафтних комплексів за спектральними і текстурними характеристиками оптично активних компонентів водного середовища, розроблені методики виявлення джерел забруднень водного середовища, оцінки якості води та трофічного стану водойм, інвентаризації та контролю гідрофізичної мережі в руслах річок у місцях урбанізації та ін. (Лялько В. І., Федоровський О. Д., Рябоконенко О. Д. та ін. Використання космічної інформації у вирішенні водогосподарських і водоохоронних завдань // Космічна наука і технологія.—1997.—№ 3/4.—С. 40—49; Федоровский А. Д., Сиренко Л. А. Роль космической информации в решении водохозяйственных и гидроэкологических задач //

Гидробиологический журн.—1998.—**34**, № 4.—С. 3—15).

Створена оригінальна методика і програмне забезпечення оцінки санітарно-екологічного стану і біопродуктивності в прибережних водах — у екотонах «річка—море», «ріка—водоймище» на основі аерокосмічної інформації і системного моделювання. В основу методики покладено взаємозв'язок характеристик конкретного типу екотону з гідрологічними і гідрохімічними параметрами водного середовища (проточністю, рівнем pH, трофністю, наявністю забруднень та ін.). Визначення типу екотону провадиться за гідрологічними, гідробіологічними, гідрофізичними та іншими ознаками на основі дешифрування космічних знімків, наземних вимірів і системного моделювання. (Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Суханов К. Ю. и др. Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации // Космічна наука і технологія.—1996.—**2**, № 5/6.—С. 103—106, Федоровский А. Д. К вопросу дешифрирования космических снимков природных ландшафтов // Космічна наука і технологія.—1999.—**5**, №. 5/6.—С. 9—15).

Створена імітаційна еколого-економічна модель комплексного водокористування в гідроенергетиці на базі методу системної динаміки та нових принципів обробки аерокосмічної інформації. Проблема комплексної експлуатації водних і біологічних ресурсів водоймищ ГЕС потребує створення науково-обгрунтованої технології контролю і управління розвитком усього гідроенергетичного комплексу. Водоймища гідроелектростанцій України є об'єктами інтенсивного використання в різноманітних областях господарської діяльності: комунальної, промислової, транспортної, сільськогосподарської, рибної, рекреаційної та ін. Вимоги різних споживачів води до кількості та якісних показників водного середовища значно відрізняються між собою, а іноді суперечать інтересам основного споживача — гідроенергетики. Відсутність науково-обгрунтованих методів контролю і управління взаємодією споживачів води, що враховують багато чинників, також не сприяє вирішенню виникаючих проблем. При цьому, як правило, не враховується, що з водними ресурсами тісно пов'язане нормальне функціонування енергетичних систем, причому не тільки ГЕС, але й АЕС, ТЕС, ГАЕС. (Федоровский А. Д., Тимченко И. Е., Сиренко Л. А., Якимчук В. Г. Об эколого-экономической модели комплексного водопользования в гидроэнергетике // Доп. Національної академії наук України.—2001.—№ 1.—С. 140—143).

Вперше в Україні розроблено методику та математичне забезпечення оцінки ефективності параметрів космічних апаратурних комплексів та виконання тематичних задач ДЗЗ. Виконано кількісну оцінку ефективності виконання тематичних задач ДЗЗ та розділів «Науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-1М». За узагальнений критерій прийнято «функцію приналежності», яка визначає можливість виконання програми досліджень певним складом апаратури. При цьому частковими критеріями будуть «функції відповідності» — оцінки відповідності параметрів вимірювальної апаратури характеристикам тематичних задач. Виконавши обчислення для всіх задач і апаратурних комплексів, можна визначити оптимальний комплекс апаратури для найбільш ефективного вирішення всієї програми ДЗЗ. (Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Об оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Доп. Національної академії наук.—2001.—№ 10.—С. 120—124).

Обгрунтовано методику зовнішнього контролю параметрів оптичних систем ДЗЗ, що функціонують на борту космічного апарата (контроль роздільної здатності і функції передачі модуляції (ФПМ) апаратури ДЗЗ з урахуванням впливу атмосфери і факторів польоту супутника). Традиційні методи наземної перевірки розрізнювальної здатності бортової оптичної апаратури засновані на безпосередньому скануванні спеціальних калібрувальних мір, розташованих на земній поверхні. Це пов'язано зі створенням досить складних і дорогих споруд. ФПМ однозначно пов'язана з розподілом освітленості в зображенні межі розділу між контрастними ділянками на космічному знімку (світлим і темним, теплим і холодним). Зображення цієї межі («крайовий слід») було виміряно (фотометровано) безпосередньо на космічному знімку. Результати цих вимірювань у вигляді «пограничної кривої» є основою для наступних розрахунків ФПМ і розрізнювальної здатності оптичної апаратури ДЗЗ. (Федоровский А. Д., Кононов В. И., Суханов К. Ю. Обоснование методики внешнего контроля космической оптической аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности // Космічна наука і технологія.—1997.—№ 3/4.—С. 50—53).

Створена методика і комп'ютерна програма оцінки якості космічних знімків. Досвід дешифрування космічних зображень показує, що не завжди кращий за розрізнювальною здатністю космічний знімок є інформативнішим і забезпечує більшу ймовірність розпізнавання досліджуваних об'єктів. З метою дослідження кореляційних зв'язків значень різноманітних критеріїв оцінки якості космічних знімків (ефективності програм їхньої тематичної обробки) із ймовірністю розпізнавання зображень об'єктів проведено дослідження на основі фізичного і комп'ютерного моделювання. У результаті порівняльного аналізу таких критеріїв, як роздільна

На борту літака-лабораторії Центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України

Вертоліт із встановленим на ньому тепловізором «Пінгвін» та морська поверхня в ІЧ-області спектру (8—14 мкм)

Співробітники Київського відділу ІГіРГК на аеровізуальних спостереженнях (Л. П. Ліщенко, В. І. Муравська, С. Н. Решетняк, А. Г. Мичак)

Співробітники Київського відділу ІГіРГК на польових дослідженнях в Закавказзі (О. І. Головащук, В. С. Галянт, В. Є. Філіпович, С. О. Пономаренко, В. М. Перерва)

Головнокомандувач Військово-Морського флоту СРСР адмірал С. Г. Горшков з великим інтересом слухає доповідь О. Д. Федоровського

Тепловізор «Вулкан» та знімок ставка—охолоджувача Чорнобильської АЕС, отриманий за його допомогою

Група аерокосмічних досліджень міських та промислових агломерацій. Зліва-направо: В. Є. Філіпович, А. Г. Мичак, Л. П. Ліщенко, Д. О. Тарангул, О. М. Теременко, Г. В. Приходько, Н. І. Гончаренко, О. І. Кудряшов. Фото 2002 р.

Відділ аерокосмогеологічних досліджень. Зліва-направо: В. І. Самойленко, А. Й. Недошовенко, О. І. Кудряшов, Л. П. Ліщенко, О. М. Теременко, А. Г. Мичак, І. М. Городнянська. Фото 1992 р.

М. С. Щепець (ДКП «Плесо», Постійна комісія з питань техногенно-екологічної безпеки при Київській міській державній адміністрації) та О. М. Теременко за вирішенням геоекологічних проблем столиці

здатність, відношення сигнал/шум у просторово-частотній області спектру, логарифмічна форма відношення сигнал/шум, критеріїв, сформованих на основі функції передачі модуляції, та ін. Виявлено, що найбільшою мірою корелюючим із ймовірністю розпізнавання об'єктів є логарифмічна форма відношення сигнал/шум. Цей критерій можна використовувати для оцінки якості космічних знімків. (Федоровский А. Д., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 24—31).

Перспективними у відділі аерокосмічних досліджень у геоекології є такі напрямки:

1. Розробка методик і комп'ютерних програм формування й оцінки ефективності аерокосмічних апаратурних комплексів ДЗЗ на основі системного підходу.

Завдання полягає в аналізі основних характеристик існуючих і проектованих приладів дистанційного зондування Землі для наступного синтезу комплексу апаратури, сукупність параметрів якого забезпечить виконання тематичних задач космічної програми ДЗЗ із найбільшою імовірністю. Розв'язання цієї задачі пов'язано з розробкою методології синтезу й аналізу складу апаратурних комплексів (АК), а також із формуванням критеріїв оцінки їхньої ефективності. Ці питання є центральними, і дотепер остаточно не вирішені. Синтез АК може бути виконано на основі алгоритмів векторної оптимізації за критеріями інформативності, продуктивності й оперативності. Кожний із параметрів АК, що є складовою частиною вектора стану, являє собою елемент системи, який відповідає її цільовим засадам. Відомі методи синтезу основних параметрів АК, що мають за основу алгоритми випадкового пошуку, цілочислового лінійного програмування, динамічного програмування, відсікання безперспективних варіантів та ін.

Перспективною вважається розробка методології вирішення вказаних задач на основі системного підходу, що забезпечить проведення досліджень на різноманітних рівнях абстрактного опису: лінгвістичному, логіко-математичному, інформаційному й евристичному. Це дозволить визначити цільові засади й основний набір елементів, із яких повинний бути сформований АК; забезпечить розробку критеріїв підбору найраціональніших цільових засад; визначить послідовність операцій, що ведуть до досягнення цілей з можливістю їхнього коригування. Поряд із критерієм ефективності (якості функціонування АК) беруться до уваги і критерії, що характеризують такі властивості АК, як надійність, маса, габарити, перешкодозахищеність, енергетичні витрати, вартість та ін.

2. Розробка методик і комп'ютерних програм дешифрування космічних знімків ландшафтних комплексів на основі ландшафтно-системного підходу.

Космічне ландшафтознавство є одним із наукових напрямків, що активно сприяють дослідженню і вирішенню різноманітних природогосподарських і природоохоронних задач. Вивчення і класифікація ландшафтних комплексів (ЛК) необхідні для проведення геофізичного районування території, обґрунтування різноманітних організаційно-господарських і технічних заходів, пов'язаних із землекористуванням, сільським господарством, задачами лісового і водного господарства, міським і гідротехнічним будівництвом. На відміну від традиційних методів дешифрування космічних знімків, що використовують спектральні ознаки, існує принципово інший підхід до дешифрування і класифікації космічних зображень ЛК, в основу якого покладено ландшафтно-системний метод. Суть його полягає в аналізі природного середовища на різноманітних рівнях абстрактного опису з урахуванням ієрархії і пріоритетів у природній системі. При морфолого-генетичному принципі класифікації ЛК останні мають усі риси, що властиві ієрархічним системам. Поняттями більш низького таксонометричного рангу виступають: місцевості, урочища, для урочищ — фації. За сукупністю ознак, що впевнено дешифруються на аерокосмічних знімках, оцінюються основні геоекологічні характеристики досліджуваних регіонів, і на цій основі непрямими методами виявляються ті геоекологічні процеси і явища, що не піддаються прямому дешифруванню. Такими є рівень грунтових вод, зони інтенсивного накопичення забруднень, ділянки можливого підтоплення. Для водного середовища, переважно в зонах екотонів типу «ріка—водоймище», «ріка—море» і на мілководних ділянках «ріка—берег» за типом ЛК можна оцінити якість води, біопродуктивність, стан нерестовищ та ін.

Крім того, для майбутніх космічних систем важливим є питання розподілу інформації для обробки між бортовими і наземними засобами. Шляхом підвищення рівня обробки на борту КА і передачі інформації безпосередньо споживачу мінімізуються вимоги до ресурсів радіозв'язку й економляться кошти.

У зв'язку з цим перспективною є розробка методів і програм автоматизації обробки КС ЛК, у тому числі на борту КА на основі ландшафтно-системного підходу з використанням структурно-текстурних інформативних ознак. При цьому залучаються такі методи обробки КС ЛК: просторово-частотний аналіз, марківські моделі зображень, фрактальна геометрія, теорія нейронних сіток та ін. Результат досліджень — створення програмного продукту, що узагальнює розроблені найбільше

ефективні методи і програми дешифрування КС ЛК (CASRE-Imagine).

3. Розробка методик і комп'ютерних програм оцінки та імітаційної моделі функціонування системи ДЗЗ на основі методу системної динаміки й АВС-технології.

Для успішного функціонування систем ДЗЗ з одним або кількома КА необхідні такі інформаційні технології, що дозволяють послідовно приймати раціональні рішення щодо експлуатації і розвитку системи і при цьому коригувати неминучі помилки керування. У ряді випадків імітаційне моделювання може бути єдиним засобом визначити кількісну характеристику системи. Тому одержання прогностичних сценаріїв функціонування системи ДЗЗ актуальне і має важливе значення для забезпечення вирішення тематичних задач ДЗЗ.

Перспективною є розробка методології побудови імітаційної моделі системи ДЗЗ, на основі методу системної динаміки й АВС-технології керування складними системами. Суть АВС-технології (адаптивного балансу впливів) полягає в тому, що досліджувана система формується з окремих модулів, кожний із який знаходиться в стані динамічної рівноваги. Останнє підтримується функціями впливу, що зв'язують між собою модулі системи. Тому усередині системи зберігається режим динамічного балансу впливів.

Імітаційна модель повинна бути достатньо простою для виконання багатократних «прогонів», щоб забезпечити збір статистичних даних і досліджувати різноманітні можливі ситуації.

Група аерокосмічних досліджень міських та промислових агломерацій. Історія заснування групи аерокосмічних досліджень міських та промислових агломерацій України бере свій початок з часу заснування ЦАКДЗ ІГН НАН України. 1992 р. в структурі Центру було засновано відділ аерокосмогеоекологічних досліджень. Основний напрямок робіт колективу було вивчення екологічного стану довкілля, на основі використання матеріалів дистанційних зйомок, а також розробка методичних основ складання карт для завдань екологічного моніторингу.

Відділ у складі восьми співробітників очолив кандидат геологічних наук Анатолій Йосипович Недошовенко — вчений з широким світоглядом, який займався фундаментальними проблемами нафтогазової геології, тектоніки, екології, дистанційними дослідженнями Землі. Він — автор більше 100 наукових праць; співавтор восьми монографій. У розквіті творчих сил 1998 р. А. Й. Недошовенко пішов із життя.

У відділі спочатку працювали: наукові співробітники Мичак Антон Григорович, Теременко Олександр Миколайович, Кудряшов Олександр Іванович, Ліщенко Людмила Павлівна; інженери Самойленко Віра Іванівна, Городянська Ірина Олександрівна та Гончаренко Ніна Іванівна. Усі вони були фахівцями реорганізованого на той час Київського науково-дослідного інституту космоаерометодів, мали чималий досвід аерокосмічних досліджень нафтогазоносних територій України та колишнього СРСР.

Першою науковою розробкою колективу була тема «Вивчення геологічних умов, впливу техногенних факторів на навколишнє середовище та методика складання карт для завдань аерокосмічного моніторингу». Використовуючи матеріали аерокосмічних зйомок, співробітники досліджували зміни природного середовища під впливом техногенезу. За результатами проведених досліджень запропонована методика складання карт геоекологічного змісту для завдань аерокосмічного моніторингу, розроблена знакова система для карт різних масштабів та регіонів України. Виконуючи цю тематику, відділ налагодив творчу співпрацю з багатьма державними установами та організаціями, зацікавленими у використанні матеріалів дистанційних зйомок (МДЗ) при тематичних дослідженнях.

У 1996 р. відділ поповнився с.н.с. Дмитром Олександровичем Тарангулом.

1997 року в ЦАКДЗ було введено новий штатний розклад, і колектив в якості групи увійшов у склад відділу аерокосмічних досліджень в геоекології, який очолив член-кореспондент НАН України А. Д. Федоровський.

Починаючи з 1998 р., керівництво науково-дослідною роботою групи здійснює с.н.с., к.г.н. А. Г. Мичак. Тематика досліджень колективу спрямовується на комплексне вивчення змін природного середовища України, які відбуваються під впливом техногенних факторів. Розробляється теорія та методика використання матеріалів аеро- та космозйомок у вузьких діапазонах електромагнітного спектру для вирішення геоекологічних завдань. З 2000 р. група виконує дослідження за темою «Розробка методичних основ оцінки техногенного навантаження ландшафтів міських територій України на основі даних аерокосмічних зйомок». Співробітники розробляють методику вивчення міських та гірничовидобувних природно-техногенних систем з використанням комп'ютерних технологій на прикладі міст Києва, Запоріжжя, Херсона, Борислава та Нікопольського промислового району.

У 2000 р. науковий потенціал групи підсилює с.н.с., к.г.н. Володимир Євгенович Філіпович, якій очолив новий напрямок досліджень, пов'язаний із геохімічними аспектами забруднення навколишнього середовища.

Сьогодні група займається вивченням геоекологічної інформативності МДЗ, розробляє та удосконалює методику оцінки техногенного навантаження на міські ландшафти на основі тематичного дешифрування аерокосмічних зображень з використанням ГІС-технологій; досліджує геохімічні аспекти забруднення навколишнього середовища, використовуючи дистанційні дані у комплексі з наземними дослідженнями.

Поряд з державною тематикою співробітники групи постійно проводять науково-практичні договірні дослідження.

Тривалий час (до 1996 р.) с.н.с. А. Г. Мичак та н.с. О. І. Кудряшов проводили договірні роботи з вивчення глибинної будови Українських Карпат та Передкарпатського прогину з метою пошуків пасток вуглеводнів на основі матеріалів дистанційних зйомок.

Ці дослідження показали, що застосування аерокосмогеологічних методів дозволяє отримувати суттєвий приріст нової геологічної інформації, виявляти раніше не відомі тектонічні елементи — тектонічні порушення, кільцеві структури, які контролюють нафтогазові родовища. Дістали подальший розвиток методичні прийоми аерокосмогеологічних досліджень (АКГД) в умовах Карпатської нафтогазоносної провінції, які забезпечують прогнозування нових нафтоперспективних об'єктів.

Починаючи з 2000 р. співробітники групи А. Г. Мичак, О. І. Кудряшов, В. Є. Філіпович, Л. П. Ліщенко проводять дослідження забруднення приземного шару атмосфери газоподібними вуглеводнями території м. Борислава Львівської області, що виникла внаслідок довготривалого видобутку нафти на газу в цьому регіоні. Роботи проводяться на основі комплексного використання матеріалів аерокосмічних зйомок, отриманих у вузьких діапазонах електромагнітного спектру, а також наземних геохімічних вимірів.

За результатами досліджень створено ГІС м. Борислава.

Під керівництвом с.н.с. Д. О. Тарангула протягом 1992—1996 рр. проводились АКГД у північній бортовій та прибортовій частинах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). Роботи велись на недостатньо вивчених традиційними методами площах на стадії виявлення пошукових нафтогазоперспективних об'єктів і підготовки до глибокого буріння.

Закартографовано більше ніж 30 локальних структурних форм різного ступеня перспективності. Виявлені аерокосмогеологічні об'єкти забезпечили виробничникам цілеспрямоване планування, організацію та проведення сейсморозвідувальних та газобіохімічних робіт в Охтирському нафтогазопромисловому районі. В межах контурів багатьох локальних об'єктів геолого-геофізичними методами відкриті малоамплітудні глибинні локальні структури у кристалічних та осадочних породах.

Госпдоговірні роботи, пов'язані з геоекологічними дослідженнями Київської та Херсонської міських агломерацій, з 1992 р. очолює н.с. О. М. Теременко. Ці дослідження носять комплексний характер, і до їхнього виконання, поряд з фахівцями групи, залучені співробітники інших підрозділів Центру — О. Д. Рябоконенко, Я. Л. Кудряшова, Л. Д. Вульфсон. В результаті досліджень з використанням матеріалів дистанційних зйомок створено серію карт: »Київ. Навколишнє середовище» масштабу 1:50000. На 14 картах відображено стан і розвиток складових екосистеми міста. Матеріали досліджень використані Київською держадміністрацією при складанні довгострокової Програми соціально-економічного та культурного розвитку Києва. Подібного науково-впроваджувального напрямку виконано роботи і на територію м. Херсона. Створені геоекологічні карти міста у масштабах 1:25000 і 1:10000 широко використовуються природоохоронними установами м. Херсона.

В даний період важливого значення набули роботи оцінки стану та прогнозування небезпечних геологічних процесів в межах м.Києва, де ефективно використовується розроблений у ЦАКДЗ НВЧ-вологомір. Зазначені дослідження ведуться спільно з Державним комунальним підприємством «Плесо» Київської міської держадміністрації.

Поряд з геоекологічними дослідженнями з 2001 р. за рахунок госпдоговірних робіт у групі розвивається геолого-пошукова тематика. Очолює цей напрямок с.н.с., к.г.н. В. Є. Філіпович. Це насамперед розробка методики оцінювання перспектив території північно-західних регіонів України з метою пошуків родовищ самородної міді на основі комплексної інтерпретації матеріалів аерокосмічних та геолого-геофізичних зйомок. Іншим напрямком пошукових робіт є вивчення можливостей застосування матеріалів аерокосмічних зйомок при вивченні алмазоносності південно-західної частини Українського щита. Роботи мають тісний зв'язок з виробничими підприємствами ДРГП «Північгеологія», провідні спеціалісти якого беруть участь разом з колективом групи на стадії комплексної інтерпретації аерокосмічних та геолого-геофізичних досліджень.

Сьогодні у колективі працює три старших науковихспівробітники (два кандидати геологічних наук і один кандидат географічних наук), три наукових співробітники (здобувачі ступенів кандидатів наук), провідні інженери та інженери 1-2-ї категорії, загалом 10 співробітників.

А. Г. Мичак розпочав свою діяльність в Центрі аерокосмічних досліджень у 1979 р. після закінчення географічного факультету Львівського університету. За період роботи обіймав посади молодшого наукового співробітника, начальника Карпатського загону, наукового співробітника, а з 1990 р. — старшого наукового співробітника. У 1979—1981 рр. брав участь в розробці методичних рекомендацій для проведення аерокосмогеологічних досліджень при нафтопошукових роботах у ДДЗ та у Передкарпатському прогині Займався розробкою автоматизованих методів навчання для слухачів курсів підвищення кваліфікації геологів-нафтовиків. З 1981 по 1997 рр. був відповідальним виконавцем низки тем, зв'язаних з проведенням регіональних та детальних аерокосмогеологічних досліджень в межах Карпатської нафтогазоносної провінції, метою яких було виявлення перспективних ділянок для пошуків нафтогазових родовищ. Результати досліджень склали основу його кандидатської дисертації, яку А. Г. Мичак захистив у 1998 р. і отримав науковий ступінь кандидата геологічних наук зі спеціальності «дистанційні аерокосмічні дослідження». А. Г. Мичак зараз займається геоекологічними дослідженнями міських агломерацій та промислових територій України на основі даних дистанційних зйомок.

О. М. Теременко закінчив географічний факультет, кафедру геодезії та картографії Київського університету ім. Т. Г. Шевченко в 1973 р. Перейшов на роботу до Центру в 1978 р. зі значним досвідом редакційно-картографічних робіт, який отримав в НВП «Картографія». В 1978—1983 рр. брав участь в розробці методичних рекомендацій з використання багатозональних космічних знімків при геологорозвідувальних роботах на нафту і газ. Здійснював керівництво науково-дослідним загоном при аерокосмогеологічних дослідженнях в Причорноморській і Тимано-Печорській нафтогазоносних провінціях. О. М. Теременко працював у складі авторських колективів при розробці на виданні «Структурно-тектонической карты Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции» 1:1 000 000 (1979 р.) і «Тектонической карты нефтегазоносных областей юго-запада СССР» 1:500 000 (1987 р.). Брав участь в організації курсів підвищення кваліфікації геологів-нафтовиків. З 1990 р. обіймає посаду наукового співробітника. Основним напрямком наукової роботи О. М. Теременка є геоекологічні дослідження та оцінка техногенного навантаження на урбанізованих територіях з залученням сучасних мультиспектральних дистанційних зйомок.

О. І. Кудряшов у 1979 р. здобув освіту на геологічному факультеті Київського університету за фахом «геологічна зйомка та пошуки родовищ корисних копалин». Того ж року почав працювати у ЦАКДЗ ІГН НАН України — спочатку молодшим науковим співробітником, згодом обійняв посаду геолога, старшого геолога, а з 1991 р. — наукового співробітника. Займався регіональними та детальними аерокосмогеологічними дослідженнями Передкарпатського прогину та Скибових Карпат з метою виділення перспективних площ для постановки нафтогазопошукових робіт і не покинув цю справу досі у якості пошуковця наукового ступеня. О. І. Кудряшов займається створенням ГІС геоекології міських агломерацій.

Л. П. Ліщенко — випускниця географічного факультету Київського університету 1976 р., фізик-географ, ландшафтознавець. Прийшла працювати в лабораторію аерометодів ще в 1974 р. студенткою. Досвіду набиралась в Київському відділі ІГРГК, у неї були хороші вчителі — В. І. Грідін, В. Б. Строєва, З. М. Товстюк, Є. Ф. Волонгевич, М. І. Жиловський. Їм вона завдячує своїм практичним знанням та професіональному рівню. У свій час брала участь в науково-практичних та науково-методичних напрямках нафтопошукових досліджень регіонах — ДДЗ, Західному Сибіру, Казахстані, Прикаспії, впроваджуючи геоіндикаційний, ландшафтно-індикаційний підходи при дистанційних дослідженнях. Отримала чималий досвід польових наземних та аеровізуальних спостережень на Україні та Казахстані, передавала ці знання протягом багатьох років на курсах підвищення кваліфікації, що проводив Міннафтопром. На територію Тенгіза (Казахстан) Л. П. Ліщенко вперше склала геоекологічну карту нафтопромислу. Займалась дешифруванням матеріалів аерокосмічних зйомок території вуглепромислових районів Луганської області з метою визначення швидкості змін техногенних процесів. Основним напрямком нинішніх досліджень є вивчення екзогенних процесів та техногенного навантаження за матеріалами дистанційних зйомок. Спеціалізується по вивченню змін геоекологічного стану ландшафтних комплексів гірничопромислових районів Придніпров'я, зокрема Нікопольського марганцеводобувного району, що є предметом її дисертаційної роботи.

Д. О. Тарангул закінчив географічний факультет Львівського державного університету в 1979 р. по спеціальності «геоморфологія». За період трудової діяльності з 1979 р. по травень 1990 р. працював на посадах інженера, геоморфолога, молодшого наукового співробітника, начальника загону, наукового співробітника. З червня 1990 р. виконує обов'язки старшого наукового співробітника. Протягом багатьох років Д. О. Тарангул займався детальними аерокосмогеологічними дослідженнями, які використовуються на пошуковому етапі геологорозвідувальних робіт на нафту і газ в межах ДДЗ. Виконував госпдоговірну та держбюджетну тематику, був відповідальним керівником і основним автором звітів з науково-дослідних робіт. За впровадження аерокосмічних методів при виявленні і підготовці структур до буріння нагороджений бронзовою медаллю ВДНГ. Д. О. Тарангул на основі багаторічних досліджень захистив дисертаційну роботу «Великомасштабне аерокосмічне картографування території з метою пошуку нафти і газу (теорія і практика робіт в Україні)». У ній розроблено теоретичні та методичні засади тематичного великомасштабного аерокосмічного картографування локальних пасток вуглеводнів з використанням дистанційних методів досліджень. Тепер займається відпрацюванням способів тематичного дешифрування матеріалів ДДЗ для вивчення техногенного навантаження ландшафтів міських територій України та обробкою аерокосмічних матеріалів для вивчення ландшафтних ознак магматичних утворень південно-західній частині Українського кристалічного щита.

В. Є. Філіпович працює в ЦАКДЗ з 1979 р. після закінчення географічного факультету Київського університету ім. Т. Шевченка за спеціальністю «геоморфологія». Обіймав посади: інженера, геолога, старшого геолога, начальника загону, с.н.с., завідувача лабораторії. З 1979 по 1992 рр. займався розробкою методики застосування і впровадження аерокосмогеологічних досліджень у практику нафтогазопошукових робіт у різних регіонах колишнього СРСР, зокрема у Білорусії (1979—1980 рр.), на Волино-Поділлі (1981 р.), в Українських Карпатах (1982 р.), у Закавказзі (1983—1990 рр.), Передкавказзі (1991—1992 рр.), Західному Сибіру (1990—1992 рр.). В. Є. Філіпович є співавтором піонерської методики детальних АКГД у Східній Грузії, 20 паспортів на локальні нафтогазопошукові об'єкти, які були підтверджені матеріалами геолого-геофізичних робіт. За результатами досліджень, в яких брав участь В. Є. Філіпович, відкрито газоконденсатне родовище Західне Руставі. З 1992 по 2000 рр. у якості відповідального виконавця займався розробкою методології аерокосмогеологічних досліджень при вивченні нафтогазоносних територій Азовського та шельфу Чорного морів. Особисто В. Є. Філіпович розробив метод оцінки рівня інформативності космічних зображень, отриманих у видимому діапазоні, в залежності від гідрофізичних характеристик морських вод, кліматичних чинників, літології донних відкладів та ін., які впливають на формування корисного сигналу. Разом з колективом відділу під керівництвом В. М. Перерви створена геодинамічна модель Азово-Чорноморського регіону та передані рекомендації на постановку геолого-пошукових робіт. Особливу увагу В. Є. Філіпович приділяє розробці наукових основ методики комплексування атмогеохімічних (газортутних) і аерокосмогеологічних досліджень з метою підвищення оптимізації нафтогазопошукових робіт. Результати цих багаторічних досліджень дозволили йому захистити дисертаційну роботу за спеціальністю «дистанційні аерокосмічні дослідження.»

В цілому науковцями групи опубліковано понад 100 наукових робіт, вони є авторами понад 50 звітів з науково-дослідної та виробничої тематики.

Військово-науковий компонент історії ЦАКДЗ. Як відомо, однією зі складових при створенні Центру аерокосмічних досліджень Землі у 1992 році був Київський відділ Інституту геології та розробки горючих копалин Міністерства нафтової промисловості СРСР. Саме тут у 1985—1991 рр. активно здійснювалися науково-практичні дослідження у галузі пошуку нафтогазових родовищ на базі вивчення та інтерпретації аеро- та космічних фотознімків. На той час у відділі були зібрані як відомі фахівці з теоретичних питань обробки зображень, так і фахівці з багаторічним практичним досвідом організації аерозйомки та дешифрування фотознімків. До останніх слід віднести М. А. Теплякова та О. І. Архипова. Полковник запасу, доцент, кандидат технічних наук М. А. Тепляков багато років викладав основи аерозйомки та проводив науково-дослідну роботу у Київському вищому інженерно-авіаційному військовому училищі Військово-Повітряних Сил. Ним, зокрема, вперше в Радянському Союзі у 1955 році було виконано спеціальне дослідження ландшафтів стосовно вибору оптимальних умов аерофотозйомок у зимовий період. Підполковник запасу О. І. Архипов у свої військові роки був начальником аерофотослужби Повітряної армії; діяльність цієї служби забезпечувала командування самою оперативною та точною інформацією щодо місцевості та розташованих на ній об'єктів. Ефективності досліджень сприяло також те, що відділ був дуже добре оснащений найсучаснішою на той час обчислювальною технікою, унікальними оптичними та оптико-механічними приладами отримання, обробки та дешифрування зображень і створення тематичних карт місцевості. Так, тут знаходився і успішно експлуатувався один з перших у Радянському Союзі комплексів автоматизованої обробки зображень на базі ЕОМ СМ-4 та пристрою вводу-виводу зображень ФЕАГ-200, прилад синтезу та дешифрування багатозональних аерофотознімків ПС-4, складна аерофотограметрична та картографічна апаратура. За допомогою такої матеріально-технічної бази було вирішено багато задач народногосподарського призначення. Але заради повноти картини слід додати, що, коли виникала необхідність, то ця матеріально-технічна база служила і оборонним задачам та завданням підготовки військових фахівців, про що, зокрема, свідчить наведений нижче лист.

З 1980 по 1983 рр. в КВІГіРКК працювали доцент, кандидат технічних наук полковник-інженер О. О. Черонков та підполковник-інженер В. М. Черевко.

У перші роки створення Центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України сюди прийшов на постійну роботу ще один у минулому військовий науковець — підполковник запасу В. І. Кононов, кандидат технічних наук, доцент, відомий фахівець у галузі оцінки ефективності іконічних систем дистанційного зондування, який досить швидко вийшов на практичні результати та рекомендації, що сьогодні використовується широким колом замовників аерокосмічної іконічної інформації.

З дня створення в Центрі спецради із захисту докторських дисертацій до її складу увійшли начальник кафедри КВІАВУ, доктор технічних наук полковник-інженер Ю. К. Ребрін та доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки України, полковник-інженер М. О. Попов.

У 1994 р. зразу ж після закінчення КВІАВУ два його випускники, що закінчили з «червоними» дипломами, демобілізувавшись, прийшли працювати в Центр.

У 1992—1993 рр. перед наукою постали нові задачі, які були пов'язані із розробкою й обгрунтуванням технічних вимог до бортової оптико-механічної та радіолокаційної апаратури дистанційного зондування, що розміщувалась на перших вітчизняних авіаційних та космічних платформах. У вирішуванні цих задач активно використовувався досвід військових у минулому науковців, насамперед В. І. Кононова. Експериментальні результати підтверджують коректність зроблених оцінок і правильність наданих концептуальних рекомендацій щодо розвитку та побудови вітчизняних аерокосмічних систем дистанційного зондування Землі.

З розгортанням досліджень у галузі дистанційного зондування Землі гостро постала проблема браку відповідних фахівців, тому виникла об'єктивна потреба організації у Центрі спеціалізованої вченої ради, яка й була створена Наказом ВАК України у 1993 р. Істотний внесок у підготовку наукових кадрів аерокосмічного дистанційного зондування на різних етапах діяльності Центру і функціонування його спеціалізованої вченої ради надали полковники запасу, доктори технічних наук, професори Ю. К. Ребрін, С. О. Покотило, І. І. Заруднєв, М. О. Попов, у кожного з котрих за плечима чисельні приклади успішного вирішування як оборонних задач, так й задач народногосподарчих, десятки учнів. Так, не одне покоління військових фахівців та науковців у галузі отримання, обробки та дешифрування інформації опановувало цю науку за підручником Ю. К. Ребріна «Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов», посібником М. О. Попова і В. Л. Моісеєва «Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков». І сьогодні ці видання використовуються у навчальному процесі в Жи-

томирському військовому інституті радіоелектроніки, вищих військових навчальних закладах Російської Федерації.

Існує й інша тенденція, коли штатні співробітники Центру об'єднують, при необхідності, свої зусилля зі спеціалістами Національного космічного агентства України, Міністерства надзвичайних ситуацій України, Міністерства оборони України для вирішення актуальних наукових та прикладних проблем. Так, наприклад, організовано і успішно здійснюється наукове супроводження блоку вітчизняної космічної програми, пов'язаного із запуском штучних космічних супутників Землі серій «Січ» та «Океан»; тут співпрацюють професори В. І. Лялько, О. Д. Федоровський, доцент В. І. Кононов. Другий приклад — спільна робота у проекті «Сула», який реалізовувався у 1992—1994 рр. за замовленням Міністерства оборони України (наукові керівники проекту — Ю. К. Ребрін і М. О. Попов, науковий консультант проекту — В. І. Лялько).

У минулому році, після закінчення служби у Збройних Силах України, до колективу Центру приєднався доктор технічних наук професор М. О. Попов, перу якого належать декілька монографій з питань обробки та автоматизованого дешифрування аерокосмічних зображень, понад 40 патентів та авторських свідоцтв, багато інших наукових праць. Можна очікувати, що його досвід буде сприяти підвищенню якості вирішування завдань, подальшому розгортанню наукових досліджень у Центрі.

ПЕРЕДБАЧУВАНЕ МАЙБУТНЄ

Сучасні світові тенденції розвитку космічних технологій свідчать, що поряд із запусками ракетносіїв, вирішенням навігаційних і телекомунікаційних завдань дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), належить до категорії найбільш пріоритетних напрямів, у рамках якого розв'язуються найактуальніші природоресурсні та природоохоронні задачі. Тому промислово розвинені країни велику увагу приділяють саме ДЗЗ, забезпечуючи відповідне фінансування цих робіт.

Однак як за кордоном (меншою мірою), так і в Україні (суттєво) не завжди широко й оперативно використовуються матеріали космічних зйомок для вирішення зазначених завдань. Відбувається це не лише через брак фінансування, але і через недостатню інформаційну і технічну підготовку потенційного (і досить великого) ринку користувачів.

Зарубіжний досвід показує, що вирішення цієї проблеми може бути знайдено при реалізації державою ряду заходів у рамках відповідної протекціоністсько-освітянської політики, а саме:

— цільового фінансування розробок нових космічних методик і технологій виконання зйомок та тематичної комп'ютерної інтерпретації одержаних матеріалів;

— створення міжвідомчої багаторівневої системи навчання та підвищення кваліфікації користувачів і розробників стосовно ДЗЗ (в Україні це варто організувати на базі установ НАН України, що мають відповідний досвід та кваліфікацію спеціалістів);

— пайове фінансування (НКАУ, НАН України, відомства та ін.) спільних пілот-проектів, які виконуються разом вченими і виробничниками з метою навчання останніх та практичної підготовки їх до самостійної роботи;

— створення (або придбання за рубежем) сучасної знімальної та дешифрувально-інтерпретаційної техніки;

— терміновий запуск в експлуатацію в Україні пункту прийому інформації високого розрізнення з вітчизняних та зарубіжних супутників (увійти, якщо це можливо, у кооперацію з іншими розвинутими країнами);

— створення системи оптимальної міжнародної кооперації з метою зменшення витрат на запуски національних супутників при максимальному використанні даних зйомок з космічних апаратів міжнародного співтовариства.

Враховуючи специфіку сучасного економічного стану та ринку споживачів матеріалів ДЗЗ в Україні, а також те, що в Законі «Про космічну діяльність» зазначено, що НКАУ повинно забезпечувати своєю діяльністю державну й економічну безпеку країни, основні концептуальні положення стосовно розвитку ДЗЗ у новій Державній космічній програмі України на 2002—2006 рр. можна сформулювати так.

1. При плануванні та організації робіт з ДЗЗ необхідно дотримуватися такого:

— застосовувати сучасні прилади з високою розрізнювальною здатністю (геометричною і спектральною), використовувати всі можливі діапазони (видимий, інфрачервоний, радіохвильовий) та тонкі фізичні механізми (поляризація, флюоресценція, інтерферометрія та ін.) з метою суттєвого підвищення інформативності зйомок при спільній синергетичній обробці одержаних матеріалів;

— враховувати досвід експлуатації і матеріали зйомок із зарубіжних космічних апаратів (КА);

— особливу увагу приділити проведенню наземних і авіаційних калібрувально-звіркових робіт на унікальних українських полігонах (Чорнобильський, Кримський та ін.), які можуть становити інтерес також і для калібрування матеріалів зарубіжних космічних зйомок, тобто бути внеском України в міжнародну кооперацію ДЗЗ;

— вважати пріоритетним створення сучасного методично-технологічного комплексу комп'ютерної тематичної інтерпретації матеріалів ДЗЗ з залученням матеріалів полігонних калібрувально-завіркових робіт, який не матиме аналогів на світовому рівні;

— терміново ввести до ладу пункт прийому інформації високого розрізнення із супутників.

2. Сьогодні найважливіші і найактуальніші задачі, що можуть ефективно й економічно вирішуватися для України із застосуванням інформації ДЗЗ (крім успішно діючого блока гідрометеорологічних прогнозів), такі: забезпечення роботи космічного блока системи екологічного моніторингу країни й окремих регіонів, прогнозування врожайності сільськогосподарських культур і пожежонебезпечності лісів, пошуки нафтогазових покладів, періодична оцінка стану міських агломерацій (зсуви, підтоплення тощо) та якості земель (в процесі земельної реформи); вивчення сучасних геодинамічних процесів при реструктуризації вугільних шахт та ін.

3. З метою скорочення витрат і термінів вирішення вказаних завдань, а також створення широкого ринку користувачів інформацією ДЗЗ у країні пропонується таке: впровадити: комплексну організаційно-навчальну систему регулярного підвищення кваліфікації користувачів і розробників у напрямку ДЗЗ; створити їхні спільні команди для виконання конкретних проектів; максимально використовувати матеріали космічних зйомок зарубіжних КА.

В Україні вже настав час, коли починають з'являтися паростки нових наукових і науково-організаційних технологій, окреслюються шляхи, якими і в наших умовах можна, не розгубивши свого досвіду, виконувати те, що ми вміли і вміємо, не гірше, ніж це робиться на світовому рівні.

Досвід роботи нашого Центру свідчить, що в сучасних соціоекономічних умовах для того, щоб знайти свою наукову нішу, продукція якої матиме попит і відносно стабільний та широкий ринок, треба мати порівняно невеликий, але висококваліфікований колектив фахівців фізико-математичного, технічного і природознавчого профілю, які освоїли комп'ютерні технології та іноземні мови. За цих умов можна ефективно перенацілювати такий осередок на оперативне розв'язання актуальних задач, виграючи відповідні вітчизняні і зарубіжні гранти.

Віддача від подібної організації роботи зростає при поєднанні в спільних дослідженнях досвіду фахівців старшої генерації із сучасними знаннями молодого покоління. При цьому варто обов'язково залучати до виконання контрактних робіт спеціалістів відповідних відомств як консультантів і виконавців наземної калібровки та завірки матеріалів аерокосмічних зйомок.

Саме подібний підхід дозволив нам виграти ряд вітчизняних і зарубіжних грантів (зокрема у космічних агентств ФРН, Франції, Європи та ін.) та вперше розробити і впровадити у виробництво нові супутникові технології пошуків нафтогазових покладів на шельфі та суходолі, оцінки забруднення територій та акваторій токсикантами (зокрема радіонуклідами Чорнобильської зони), оцінки фітосанітарного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування врожайності зернових культур, повеней, підтоплення територій та ін.

Ці технології доведені до практичного впровадження в таких відомствах як Міністерство надзвичайних ситуацій України, НАК «Нафтогаз України», ВАТ «Укрнафта», Київська та Херсонська міські адміністрації та ін.

Ми продовжуємо лінію на оволодіння найсучаснішими супутниковими та інформаційними технологіями шляхом як організації вітчизняної системи підвищення кваліфікації науковців, так і їхнього стажування у визнаних світових центрах цього напряму. Наприклад, у 2000 р. наші співробітники пройшли стажування в інституті ESRIN Європейського космічного агентства, де оволоділи найновішою космічною технологією так званої радарної інтерферометрії, яку вперше в Україні успішно застосували для вирішення актуальної задачі оцінки осідання земної поверхні в Донбасі внаслідок масового закриття вугільних шахт.

Конкретним прикладом реалізації вказаного підходу до організації та координації досліджень у рамках Державної космічної програми України є створення в 2001 р. Атласу «Космос — Україні», в якому наведено результати вирішення за допомогою комп'ютерної інтерпретації космознімків 40 актуальних для України тематичних задач.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДОСЛІДЖЕНЬ В ЦАКДЗ

Будуть продовжені роботи в рамках Космічної, Енергетичної та Чорнобильської програм з науково-методичного забезпечення створення аерокосмічного блоку Системи екологічного моніторингу України та пошуків нафтогазових покладів на шельфі України. Зокрема, будуть розроблені і впроваджені нові методи і технології для оперативної оцінки екологічного стану та врожайності зернових в межах Київської агломерації, екології водоймищ Дніпра та перспектив нафтогазоносності Чорноморського шельфу України.

Щоб реально збільшити середньорічний ВВП в Україні до 6—7 %, про що йдеться у посланні Президента України, треба насамперед підтримати

ті наукові розробки та технології, які вже довели свою дієвість і потребують оперативного впровадження в практику промисловості та сільського господарства.

Дослідження саме такого напряму ведуться у ЦАКДЗ ІГН НАН України, де в останні роки, як уже згадувалось, розроблені наукові основи нової супутникової технології пошуків нафтогазових родовищ на суші та в шельфових зонах, що не має аналогів у світі (Постанова Президії НАН України № 187 від 09.06.99 р.). Доведення цієї технології до широкого промислового використання дозволить зберегти до 20 млн грн щорічно внаслідок скорочення кількості розвідувальних свердловин і буде сприяти вирішенню актуальної для України проблеми забезпечення країни власними енергоносіями.

У зв'язку з формуванням основних напрямів роботи Міністерства екології та природних ресурсів відповідно до положень послання Президента України про пріоритетні напрями розвитку держави та враховуючи багаторічний досвід нашого Центру у створенні і впровадженні нових оперативних та економічних супутникових технологій пошуків корисних копалин і оцінки екологічного стану довкілля, ЦАКДЗ пропонує провести загальну тематичну інтерпретацію матеріалів аерокосмічних зйомок (космічні апарати «Landsat» (США), «Spot» (Франція), «Океан-О» (Росія) та ін.) території України та Чорноморського шельфу з нафтогазопошуковою метою.

Досвід ЦАКДЗ свідчить, що при реалізації цієї пропозиції вже через рік досліджень можна запропонувати три-чотири нафтогазоперспективні площі (з імовірністю відкриття на них промислових родовищ близько 80 %), на яких треба відразу розпочати тривимірну детальну сейсморозвідку та буріння розвідувально-експлуатаційних свердловин. Фінансування таких робіт, враховуючи купівлю космознімків, комп'ютерну інтерпретацію і обробку геолого-геофізичних матеріалів, має складати близько 1 млн грн.

Вченими Центру (к.г.м. н. В. М. Перерва, к. фіз.-мат. н. Ю. В. Костюченко та ін.) одержані принципово нові наукові результати з комп'ютерної інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок у видимому, інфрачервоному та радіохвильовому діапазонах для вирішення актуальних для України завдань пошуку нафтогазових родовищ на суші та в шельфовій зоні.

Теоретичною основою аерокосмічних пошуків нафтогазових покладів є наявність аномалій геофізичних, геодинамічних і біохімічних полів над покладами вуглеводнів, які формують на земній поверхні специфічні особливості ландшафту, зміни спектральних характеристик рослинності, теплового поля та ін. Ці зміни характеристик земної поверхні можуть бути визначені шляхом обробки матеріалів мультиспектральних аерокосмічних зйомок у видимому, інфрачервоному та радіохвильовому діапазонах.

Особливо треба відмітити принципово новий підхід до пошуків нафтогазових родовищ на шельфі на підставі аналізу матеріалів багаторазових космічних зйомок в інфрачервоному (тепловому) діапазоні та виявленню за їхньою допомогою ділянок морської поверхні з відносно зниженою температурою поверхні (в літні періоди). Негативна аномалія температури формується тут внаслідок підіймання придонної газованої (холодної) води. Вона насичується газом, який мігрує з нафтогазових покладів. У такий спосіб визначаються площі, перспективні на наявність нафти і газу, в межах яких треба проводити великомасштабні геофізичні роботи та розвідувальне буріння. Це буде сприяти суттєвому прискоренню нафтогазопошукових робіт і вони стануть дешевшими.

Широке впровадження згаданих технологічних розробок у виробничому режимі вимагає доробки деяких її елементів (створення комплексної комп'ютерної програми тематичної інтерпретації матеріалів дистанційних зйомок і наземних досліджень на основі принципів синергізму, створення фізико-математичних моделей формування корисних спектральних сигналів земних утворень в різних діапазонах та нових нафтогазопошукових критеріїв на їхній основі та ін.).

Пріоритет наших вчених належним чином оцінено на Міжнародному конгресі з проблем ДЗ Землі, який відбувся у липні 1996 р. у Відні. Насамперед це робота нашого Центру по створенню моніторингу для вивчення впливу аварії Чорнобильської АЕС на навколишнє середовище. Інтерпретуючи за нашою методикою матеріали аерокосмічних спектральних зйомок, визначено ступінь забруднення території на значній площі (канд. геол.-мінер. наук О. І. Сахацький, канд. геол. — мінер. наук А. Я. Ходоровський, канд. фіз.-мат. наук З. М. Шпортюк та ін.). Подібної технології немає в світі.

Для побудови карт радіологічного стану зони впливу аварії на ЧАЕС були використані результати аналізу інтегрального впливу токсикантів на спектральну яскравість рослин. Оптичні властивості рослин вимірювались на багатоспектральних знімках із супутників «Ресурс» (Росія), «Landsat» (США), «Spot» (Франція). Одержані результати дали можливість створити реальну картину зон радіаційного забруднення та за її межами. Просторовий і кількісний розподіл радіонуклідів, відображений на карті, збігався з даними, одержаними в результаті завірочних наземних досліджень.

Зараз гамма-фон формують в основному ^{137}Cs та ^{90}Sr. Радіоактивність, яка змінюється, дозволяє вносити корективи у деякі види господарської діяльності. Так, об'єднання «Чорнобильліс» планує свою роботу з урахуванням показників інтегрального впливу токсикантів на рослинність та кількісного вмісту радіонуклідів у грунті, що відображені на карті екологічного стану зони впливу ЧАЕС, а також використовує матеріали створеної нами карти пожежонебезпечності та фітостану лісових масивів. Такі карти можна будувати і для районів, прилеглих до великих промислових центрів, які впливають на стан довкілля. Значний інтерес ця інформація має для держадміністрацій, комунальних, природоохоронних установ, організацій, які експлуатують водосховища. За допомогою комп'ютерної обробки космічних знімків були отримані кольорові зображення джерел, концентрації та просторового розподілу забруднення Дніпра в районах Києва та Запоріжжя, а також у гирлі р. Самара та Самарської затоки (чл.-кор. НАН України О. Д. Федоровський та ін.).

Використовуючи аерокосмічні зйомки, Центр виконав значний обсяг робіт з ландшафтно-функціонального та екологічного районування Києва, Дніпропетровська, Запоріжжя та Херсона. Визначений їхній екологічний стан, виявлені зони, яким загрожує підтоплення, зсуви, встановлені розломні зони, де побудова великих промислових підприємств і висотних будинків неприпустима. За сприяння держадміністрації вперше були створені та передані для практичного використання техногенні карти Києва та Херсона. Виявили бажання мати такі карти Миколаїв, Вінниця, Полтава, Житомир (канд. фіз.-мат. наук Л. Д. Вульфсон, О. М. Теременко та ін.).

Космічні знімки відіграють значну роль при здійсненні земельної реформи в країні. Зроблені в оптичному, тепловому і радіодіапазонах, вони дозволяють визначити якість землі, вологість грунту, рівень підземних вод, наявність ерозії та джерел забруднення.

На жаль, не вдається досягти обов'язкового широкомасштабного залучення цих методів як першочергового економічного і оперативного заходу, зокрема у переліку обов'язкових нафтогазопошукових робіт у виробничих організаціях. Причиною цього є недостатнє розуміння важливості подібного підходу керівництвом тих відомств, які відповідають за стан пошуків нафтогазових енергоносіїв.

Сучасне ДЗЗ у світі — один з трьох пріоритетних напрямів високоекономічних і оперативних космічних технологій (поряд з телекомунікаціями та навігацією). Ринок матеріалів ДЗЗ складає приблизно 1 млрд дол./рік і щорічно зростає на 15 %. Всі економічно розвинуті країни здійснюють державну підтримку цього важливого для народного господарства напряму.

Особливості економічного стану України в останні роки, пов'язаного з хронічним недостатнім фінансуванням усіх галузей народного господарства (зокрема тих, що зацікавлені у систематичному одержанні матеріалів аерокосмічних зйомок для свого повноцінного функціонування на сучасному рівні), призвели до певного дисбалансу інтересів між розробниками та користувачами інформації ДЗЗ. Нерідко розробки фахівців з тематичної інтерпретації космознімків для вирішення актуальних природоресурсних та природоохоронних задач не знаходять попиту та зацікавленості з боку тих відомств і організацій, де подібні матеріали могли б принести значну користь Україні, оскільки досвід передових країн Заходу свідчить саме про це.

Для того щоб змінити вказану ситуацію на краще, слід ввести в практику взаємовідносин між розробниками та потенціальними користувачами інформації ДЗЗ в Україні певні організаційно-фінансові передумови. Насамперед необхідно підняти та розширити рівень ознайомлення користувачів з основами сучасних методів вирішення актуальних для їх відомств задач з використанням інформації ДЗЗ. Досягти цього можна шляхом реалізації спільної участі розробників та користувачів в єдиних госпдоговорах (контрактах).

У виділених відомствами коштах на впровадження у себе сучасних аерокосмічних технологій ДЗ повинні визначатися певні суми на обгрунтування і проведення наземних калібрувально-завіркових робіт на дослідних тест-ділянках, які мають виконуватись саме спеціалістами відомства-користувача інформації ДЗ. Працюючи таким своєрідним тандемом, пара «розробник—користувач» не лише взаємно навчиться методам один у одного, що корисно у професійному плані, а й допоможе створенню певних традицій для неодмінного використання інформації ДЗ у повсякденній роботі своїх відомств та організацій, а також на перспективу.

Подібний підхід до співпраці розробників і користувачів буде сприяти розширенню впровадження нових аерокосмічних технологій ДЗЗ при вирішенні актуальних для України природоресурсних та природоохоронних задач.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 29—35

Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні

В. І. Лялько

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

ВСТУП

Сучасні світові тенденції розвитку космічних технологій свідчать, що поряд із запусками ракетносіїв, вирішенням навігаційних і телекомунікаційних завдань дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) належить до категорії найбільш важливих напрямів, у рамках якого розв'язуються найактуальніші природоресурсні та природоохоронні задачі. Тому промислово розвинені країни велику увагу приділяють саме ДЗЗ, забезпечуючи відповідне фінансування цих робіт.

На сьогодні ДЗЗ з космічних апаратів є пріоритетним напрямом в космічних програмах промислово розвинених країн. Світовий комерційний ринок матеріалів ДЗЗ складає близько 500 млн дол./рік і має тенденцію щорічного зростання приблизно на 15 %.

Структура цього науково-практичного міждисциплінарного напряму включає в себе ряд суттєво різних дисциплін (географія, геодезія, геологія, геофізика, гідрологія, метеорологія, океанологія, ботаніка, грунтознавство, охорона навколишнього середовища та ін.), що об'єднуються єдиним теоретико-методичним підходом до їхнього вивчення, який полягає у вимірюванні та тематичній інтерпретації спектральних характеристик досліджуваних об'єктів і процесів.

СТАНОВЛЕННЯ ДЗЗ В УКРАЇНІ

Істотний внесок в розвиток ДЗЗ зробили українські вчені, конструктори та інженери, які брали участь у виконанні всіх космічних програм цього напряму, що здійснювались в Радянському Союзі. Зокрема при провідній участі інститутів НАН України в цей період було успішно проведено ряд унікальних міжнародних підсупутникових експериментів («Інтеркосмос—Чорне море», «Тянь-Шань—Інтеркосмос-88», «Атлантика-87» і «Атлантика-89», «Космос-1500», «Природа» з пошуків нафтогазових покладів, з оцінки наслідків Чорнобильської катастрофи та ін.).

Зараз Україна як суверенна держава продовжує ці дослідження в рамках Державної космічної програми у співпраці з міжнародними організаціями та іншими країнами. У 1995 році здійснено запуск першого українського природоресурсного супутника «Січ-1», оснащеного засобами зйомок Землі в оптичному та радіодіапазонах. В 1999 р. разом з Росією запущено природоресурсний КА «Океан-О». Виконано дві Національні космічні програми. Зараз підготовлено проект третьої Національної космічної програми на 2003—2007 рр.

Найбільш підготовленими в галузі ДЗЗ країнами є США, Франція, Росія, Англія, ФРН, Канада, Індія, Японія, Китай, Італія. Сучасна структура функціонування і розвитку ДЗЗ складається з трьох блоків: космічні та авіаційні апарати (КА) з приладами ДЗЗ — наземні калібрувально-завіркові полігони — наземні центри прийому, обробки та розповсюдження інформації ДЗЗ. При цьому часто визнається доцільним суміщати функції центрів прийому, попередньої (міждисциплінарної) обробки, архівації та розповсюдження інформації ДЗЗ, а науково-дослідні центри тематичної інтерпретації вказаної інформації створювати окремо на базі університетських або академічних структур, що мають досвід робіт в цій галузі.

КА природоресурсного призначення обладнуються бортовою спектро- та радіометричною апаратурою, яка забезпечує зйомки земних утворень в ультрафіолетовому, видимому, інфрачервоному та радіодіапазонах.

Для того, щоб за результатами космозйомок можна було коректно вирішувати актуальні наукові та народногосподарчі задачі, бортова апаратура повинна відповідати ряду вимог. Зокрема, забезпечувати достатню роздільну здатність по простору, ширині спектру та енергетиці спектральної яскравості. Ці вимоги до апаратури, а також часу та періодичності зйомок є різними в залежності від того, які задачі вирішуються і в межах яких гео-

© В. І. ЛЯЛЬКО, 2002

Головні компоненти системи аерокосмічного моніторингу

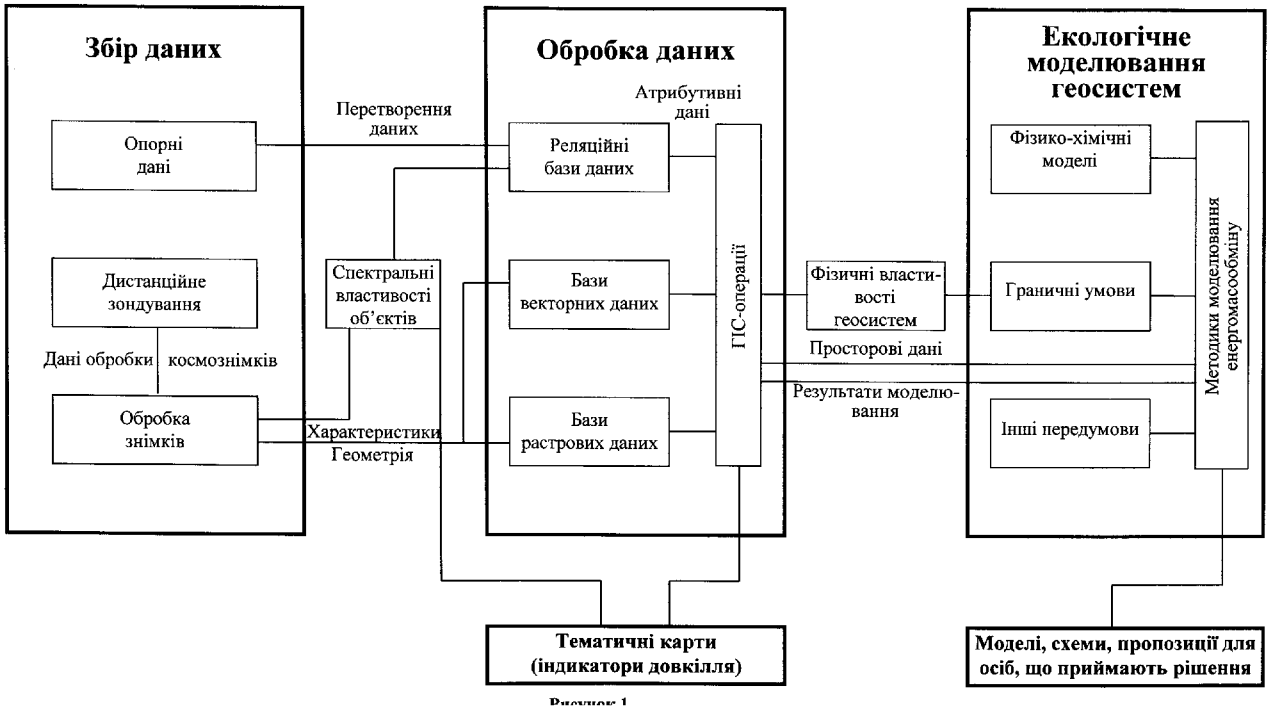


Рисунок 1

сфер відбуваються вимірювання — суходолу, морів чи атмосфери. Так, наприклад, зараз з'явилась тенденція до устаткування сучасних КА та літаків, що виконують ДЗЗ над суходолами, апаратурою підвищеної просторової та спектральної роздільної здатності (для видимого діапазону відповідно: до 1—5 м та 3—10 нм — супутники IKONOS, «Earth Watch» та ін.).

Для коректної інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок обов'язковим є проведення субсинхронних з ними наземних вимірів параметрів довкілля на спеціальних полігонах з метою побудови калібрувальних залежностей між фізичними та хімічними характеристиками рослин, грунтів, вод та ін. і одержаними дистанційно спектральними яскравостями цих видів земних утворень, а також, наземної завірки матеріалів авіакосмозйомок. З цією метою рекомендується проведення субсинхронних, так званих «етажерочних» зйомок (КА—літак—наземні роботи) в межах типових за ландшафтно-кліматичними та техногенними характеристиками полігонів. Зокрема, в Україні такими найбільш відомими полігонами є Чорнобильський (для суходолу) та Чорноморський («Кацівелі») в Криму (для моря).

Для того щоб приймати та обробляти потужні інформаційні потоки космічних зйомок Землі (до 10 Мбіт/с), які виконані з високою роздільною здатністю (КА «Landsat», «Spot» та ін.), потрібно мати приймальні антенні пристрої на 8 ГГц, програмні та комп'ютерні комплекси первинної (міждисциплінарної) та тематичної обробки даних на базі робочих станцій останніх поколінь з швидкодією на 10—100 Мбіт/с.

Структура комп'ютерної обробки та використання інформації ДЗЗ повинна складатися з трьох блоків (рисунок): даних (дистанційних та наземних) про стан довкілля — ГІС, яка обробляє вказані дані, створюючи банки даних та обчислюючи крайові умови для моделей енергомасообміну в геосистемах — моделювання енергомасообміну в геосистемах для прогнозування екологічного стану, пошуків корисних копалин та прийняття управлінських рішень з оптимального природокористування.

Слід відзначити, що подібний системний підхід до обробки інформації ДЗЗ започатковано вперше в світовій практиці саме українськими вченими, що знайшло відображення в ряді публікацій в міжнародних виданнях і отримало підтримку на останніх Міжнародних наукових форумах з ДЗЗ [1, 2].

Як видно з наведеного, в Україні є певний обсяг робіт з ДЗЗ, який міститься в уже створених: бортовій апаратурі (радіолокатор бокового огляду на КА «Січ-1», розробка ЦРЗЗ НАНУ і НКАУ),

методах і програмних засобах комп'ютерного тематичного дешифрування космознімків, ГІС-технологій та моделювання енергомасообміну в геосистемах (ЦАКДЗ та МГІ НАНУ), елементах наземної інфраструктури, що складаються з Євпаторійського та Чернігівського центрів прийому інформації ДЗЗ з КА, Київського центру «Природа» (міждисциплінарна обробка, розповсюдження та архівація матеріалів ДЗЗ) та п'ять центрів тематичної обробки цієї інформації у містах Київ (ЦАКДЗ НАНУ, на який НКАУ покладено науково-методичне забезпечення робіт з ДЗЗ в рамках Космічної програми України), Харків (ЦРЗЗ НАНУ і НКАУ), Севастополь (МГІ НАНУ), Дніпропетровськ (ДП «Дніпрокосмос»), Львів (АКІЕМ НАНУ і НКАУ), наявності калібрувально-завіркових полігонів (Чорнобильський та Чорноморський) і бортової апаратури авіаційних спектрорадіометричних зйомок у гамма-, видимому, інфрачервоному та радіодіапазонах для виконання калібрувально-завіркових робіт (ЦАКДЗ НАНУ, ЦРЗЗ НАНУ і НКАУ).

Починаючи з 1998 р. Україна приймає участь в рамках міжнародної кооперації у науково-технічному обгрунтуванні ДЗЗ з борту Міжнародної космічної станції (МКС), де передбачено створення українського модуля.

В Україні на протязі останніх десятиріч склались міжнародно визнані наукові школи в напрямку ДЗЗ, зокрема:

- Енергомасообміну в геосистемах, що дозволило розробити фізико-математичні моделі формування спектральних сигналів різними земними утвореннями та на цій основі створити сучасні технології пошуків нафтогазових покладів та контролю екологічного стану за матеріалами ДЗЗ — Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (В. І. Лялько, О. Д. Федоровський, В. М. Перерва, Ю. В. Костюченко, Л. Д. Вульфсон, О. І. Сахацький, З. М. Шпортюк та ін.).
- Супутникової океанології, що дозволило створити нові методики контролю і прогнозування океанологічних, екологічних та синоптичних процесів — Морський гідрофізичний інститут НАН України (Г. К. Коротаєв, Б. О. Шелепо та ін.).
- Аерокосмічної радіолокації, що дозволило створити унікальну бортову радіолокаційну апаратуру та методику інтерпретації матеріалів зйомок стосовно вирішення актуальних задач судноплавства в льодових умовах, синоптичних прогнозів тощо — Центр радіофізичного зондування Землі НАНУ та НКАУ (А. І. Калмиков, В. М. Цимбал та ін.).
- Створення природоресурсних космічних апаратів — конструкторське бюро «Південне» (В. Й. Драновський та ін.).
- Використання супутникових технологій для покращання стану природного середовища — Український інститут навколишнього середовища та ресурсів РНБОУ та Український центр менеджменту Землі і ресурсів (О. М. Трофимчук, О. А. Колодяжний та ін.).

Дослідження цих установ і вчених дістали міжнародне визнання і відзначені рядом премій, нагород та грантів.

Результати досліджень українських фахівців в галузі ДЗЗ публікуються у фахових журналах України («Космічна наука і технологія», «Геологічний журнал», «Морський гідрофізичний журнал», «Вісник геодезії та картографії» та ін.), а також в зарубіжних журналах та збірниках.

Спеціалісти з ДЗЗ готуються на географічному факультеті Київського університету та в Київському політехнічному інституті, а також в аспірантурі відповідних академічних установ. При Центрі аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ функціонує Спецрада із захисту докторських і кандидатських дисертацій зі спеціальності «аерокосмічні дистанційні дослідження» (фіз.-мат., технічні і геолог. науки).

ТЕНДЕНЦІЇ СУЧАСНОГО РОЗВИТКУ ДЗЗ

В останній час світовою громадськістю, міжурядовими установами та урядами багатьох країн приділяється особлива увага створенню діяльних механізмів міжнародного співробітництва з метою ефективного прогнозування, вияву та мінімізації шкідливого впливу на природу та людство несприятливих природних і техногенних явищ та катастроф.

З цією метою Генеральна Асамблея ООН у 1989 р. проголосила Міжнародне десятиліття (1990—1999 рр.) зменшення впливу природних катастроф IDNDR (International Decade for Natural Disaster Reduction).

Пріоритетне місце у вирішенні таких проблем надається методам оперативного огляду Землі у різних діапазонах електромагнітних хвиль, які здійснюються з космічних та літальних апаратів (як найбільш оперативним і економічним), тематичній комп'ютерній інтерпретації матеріалів цих зйомок з використанням ГІС-технологій з метою виявлення провісників або зародження несприятливих процесів та явищ, а також використанню одержаних даних (поряд з контактними вимірюваннями необхідних характеристик геосистем) для математичного моделювання енергомасообміну в геосистемах для прогнозування протікання несприятливих процесів та обгрунтування оптимальних технологій мінімізації втрат від цих процесів.

Подібний міждисциплінарний підхід у міжнародному співробітництві для запобігання втрат від

несприятливих природних та техногенних явищ і процесів визнано Міжнародною конференцією з систем раннього попередження природних катастроф (Потсдам, 1998) — стратегією 21-го століття.

Особлива увага приділяється використанню ДЗЗ та ГІС-технологій для обгрунтування та підтримки сталого розвитку природи, концепція якого була затверджена Конференцією ООН з питань довкілля (Ріо-де-Жанейро, 1992). З цією метою в рамках Міжнародного товариства фотограмметрії та дистанційного зондування створена відповідна робоча група (VII/2).

При цьому великого значення набуває розробка методів, програм та технологій фізичної інтерпретації матеріалів мультиспектральних зйомок з метою суттєвого підвищення вірогідності їх інтерпретації для одержання фізичних параметрів геосистем. У зв'язку з цим для підвищення достовірності та однозначності оцінки фізичних параметрів земних покривів за матеріалами ДЗЗ пропонується використовувати: по-перше, нові методи ДЗЗ (наприклад, SAR-поляриметрія, SAR-інтерферометрія, лазерна флюорометрія, мультиспектральні зйомки у видимому та ІЧ-діапазонах та ін.); по-друге, комбінувати дані радарних зйомок із зйомками у видимому та ІЧ-діапазонах, інтерпретуючи їх на основі принципів синергізму.

Окремого розгляду заслуговує можливість підвищення ефективності застосування дистан-ційних методів дослідження природних систем шляхом комплексування даних зйомок у різних спектральних діапазонах. Провідні західні галузеві аналітики вважають синергетичні* підходи найбільш перспективним напрямком при одержанні, обробці і інтерпретації космічної інформації: (L. Emiliani, G. Duchossois, 1995, Herbert J. Allgeiger, 1995, Cris Rapley, 1995).

Під синергетичними методами в дистанційних дослідженнях розуміють специфічні комплексні методики одержання, обробки й інтепретації аерокосмічної інформації, що грунтуються на спільному використанні даних, які відрізняються за методиками одержання і енергетичними діапазонами, для вирішення тематичних задач. У такому випадку синергетичними будуть: різноманітні методики комплексування одночасових зйомок; спільний розгляд різночасових, відмінних за спектральними діапазонами зйомок одних і тих же природних систем; обробка даних і моделювання інформативних ознак природних феноменів і систем із залученням результатів різноманітних за методикою експериментів; сукупна інтерпретація матеріалів різноманітних аерокосмічних досліджень і т. п. Ці синергетичні методи обробки інформації аерокосмічних досліджень Землі в англомовній літературі одержали назву «fusion».

Однак як за кордоном (меншою мірою), так і в Україні (суттєво) не завжди вдається широко й оперативно використовувати матеріали космічних зйомок для вирішення зазначених завдань. Відбувається це не лише через брак фінансування, але і через недостатню інформаційну і технічну підготовку потенційного (і досить великого) ринку користувачів.

Зарубіжний досвід і практика показують, що вирішення цієї проблеми може бути знайдено при реалізації державою ряду заходів у рамках відповідної протекціоністсько-освітянської політики, а саме:

— цільового фінансування розробок нових космічних методик і технологій виконання зйомок та тематичної комп'ютерної інтерпретації одержаних матеріалів;
— створення міжвідомчої багаторівневої системи навчання та підвищення кваліфікації користувачів і розробників стосовно ДЗЗ (в Україні це варто організувати на базі установ НАН України, що мають відповідний досвід та кваліфікацію спеціалістів);
— пайове фінансування (Національне космічне агентство України, НАН України, відомства та ін.) спільних пілот-проектів, які виконуються разом вченими і виробничниками з метою навчання останніх та практичної підготовки їх до самостійної роботи;
— створення (або придбання за рубежем — якщо це швидше і дешевше) сучасної знімальної та дешифрувально-інтерпретаційної техніки;
— терміновий запуск в експлуатацію в Україні пункту прийому інформації високого розрізнення з вітчизняних та зарубіжних супутників (увійти, якщо це можливо, у кооперацію з іншими розвинутими країнами);
— створення системи оптимальної міжнародної кооперації з метою зменшення витрат на запуски національних супутників при максимальному використанні даних зйомок з космічних апаратів міжнародного співтовариства.

Виходячи з викладеного, враховуючи специфіку сучасного економічного стану та ринку споживачів матеріалів ДЗЗ в Україні, а також те, що в Законі «Про космічну діяльність» зазначено, що НКАУ повинно забезпечувати своєю діяльністю державну й економічну безпеку країни, основні концептуальні положення стосовно розвитку ДЗЗ у новій Державній космічній програмі України на 2003—

* Синергетика, в перекладі з грецької означає «кооперативна дія», — це область знань, що об'єднує нелінійні нерівноважні процеси в різних науках (Пригожин И. От существующего к возникающему. — М.: Мир, 1985.—328 с.; Хакен Г. Синергетика. — М., 1980.—404 с.).

2007 рр. можна сформулювати так.

1. При плануванні та організації робіт з ДЗЗ необхідно дотримуватися такого:

- застосовувати сучасні прилади з високою розрізнювальною здатністю (геометричною і спектральною), використовувати всі можливі діапазони (видимий, інфрачервоний, радіохвильовий) та тонкі фізичні механізми (поляризація, флюоресценція, інтерферометрія та ін.) з метою суттєвого підвищення інформативності зйомок при спільній синергетичній обробці одержаних матеріалів;
- враховувати досвід експлуатації і матеріали зйомок із зарубіжних космічних апаратів (КА);
- особливу увагу приділити проведенню наземних і авіаційних калібрувально-завіркових робіт на унікальних українських полігонах (Чорнобильський, Кримський та ін.), які можуть становити інтерес також і для калібрування матеріалів зарубіжних космічних зйомок, тобто бути внеском України в міжнародну кооперацію ДЗЗ;
- вважати пріоритетним створення сучасного методично-технологічного комплексу комп'ютерної тематичної інтерпретації матеріалів ДЗЗ з залученням матеріалів полігонних калібрувально-завіркових робіт, який не матиме аналогів на світовому рівні;
- терміново ввести до ладу пункт прийому інформації космічних зйомок високої розрізнювальної здатності.

2. Сьогодні найважливішими і актуальними задачами, що можуть ефективно й економічно вирішуватися для України із застосуванням інформації ДЗЗ (крім успішно діючого блоку гідрометеорологічних прогнозів), є такі: забезпечення роботи космічного блоку системи екологічного моніторингу країни й окремих регіонів, прогнозування врожайності сільськогосподарських культур і пожежонебезпечності лісів, пошуки нафтогазових покладів, періодична оцінка стану міських агломерацій (зсуви, підтоплення тощо) та якості земель (в процесі земельної реформи); вивчення сучасних геодинамічних процесів при реструктуризації вугільних шахт та ін.

3. З метою скорочення витрат і термінів вирішення вказаних завдань, а також створення широкого ринку користувачів інформацією ДЗЗ у країні пропонується: впровадити комплексну організаційно-навчальну систему регулярного підвищення кваліфікації користувачів і розробників у напрямку ДЗЗ, створити їхні спільні команди для виконання конкретних проектів, максимально використовувати матеріали космічних зйомок із зарубіжних КА.

Досвід робіт з ДЗЗ в ЦАКДЗ ІГН НАН України. В Україні вже настав час, коли з'являються паростки нових наукових і науково-організаційних технологій, окреслюються шляхи, якими і в наших умовах можна, не розгубивши свого досвіду, виконувати те, що ми вміли і вміємо, не гірше, ніж це робиться на світовому рівні.

Досвід роботи нашого Центру свідчить, що в сучасних соціоекономічних умовах для того, щоб знайти свою так звану наукову нішу, продукція якої матиме попит і відносно стабільний та широкий ринок, треба мати порівняно невеликий, але висококваліфікований колектив фахівців фізико-математичного, технічного і природознавчого профілю, які освоїли комп'ютерні технології та іноземні мови. За таких умов можна ефективно перенацілювати такий осередок на оперативне розв'язання актуальних задач, виграючи відповідні вітчизняні і зарубіжні гранти.

Віддача від подібної організації роботи зростає при поєднанні в спільних дослідженнях досвіду фахівців старшої генерації із сучасними знаннями молодого покоління. При цьому варто обов'язково залучати до виконання контрактних робіт спеціалістів відповідних відомств як консультантів і виконавців наземної калібровки та завірки матеріалів аерокосмічних зйомок.

Саме подібний підхід дозволив нам виграти ряд вітчизняних і зарубіжних грантів (зокрема, у космічних агентств ФРН, Франції, Європи та ін.) та вперше розробити і впровадити у виробництво нові супутникові технології пошуків нафтогазових покладів на шельфі та суходолі, оцінки забруднення територій та акваторій токсикантами (зокрема, радіонуклідами Чорнобильської зони), оцінки фітосанітарного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування врожайності зернових культур, повеней, підтоплення територій та ін.

Ці технології доведені до практичного впровадження в таких відомствах, як Міністерство надзвичайних ситуацій України, НАК «Нафтогаз України», ВАТ «Укрнафта», Київська та Херсонська міські адміністрації та ін.

Ми продовжуємо лінію на оволодіння співробітниками найсучаснішими супутниковими та інформаційними технологіями шляхом як організації вітчизняної системи підвищення кваліфікації, так і їхнього стажування у визнаних світових центрах цього напряму. Наприклад, у 2000 р. наші співробітники пройшли стажування в інституті ESRIN Європейського космічного агентства, де оволоділи найновішою космічною технологією так званої радарної інтерферометрії, яку вперше в Україні успішно застосували для вирішення актуальної задачі оцінки осідання земної поверхні в Донбасі внаслідок масового закриття вугільних шахт.

Конкретним прикладом реалізації вказаного підходу до організації та координації досліджень у рамках Державної космічної програми України є створення в 2001 р. Атласу «Космос—Україні», в

якому наведено результати комп'ютерної тематичної інтерпретації понад 40 космознімків з українсько-російського КА «Океан-О» (та інших КА), що і зараз виконує зйомки території України. При цьому показано, як вирішується ряд актуальних природоресурсних та природоохоронних задач, які вже були названі раніше.

Як бачимо, перед нами безліч цікавих проблем, які чекають на своє вирішення за допомогою новітніх технологій. І я певен, що ці проблеми будуть успішно вирішені в рамках третьої Національної космічної програми України.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДЗЗ В УКРАЇНІ

В основних завданнях проекту нової Національної космічної програми України (2003—2007 рр.) в напрямку ДЗЗ, підготовленої Національним космічним агентством України разом з НАН України та іншими відомствами, передбачається розвиток першої черги національної системи спостереження Землі з космосу в інтересах загальнодержавних потреб у соціально-економічній сфері, сфері безпеки та оборони.

При цьому у межах цільової програми «Наукові космічні дослідження» пріоритетом визнано дослідження Землі.

Цільова програма «Дистанційне зондування Землі» суттєвим чином зорієнтована на підвищення ефективності використання космічних засобів в інтересах раціонального природокористування, екологічної та техногенної безпеки. Передбачається розвиток національної системи спостереження Землі «Січ», початок створення системи антикризового космічного моніторингу, модернізація наземних програмно-апаратних засобів приймання та обробки інформації в інтересах широкого кола споживачів.

Завдання цієї програми відповідають таким основним концептуальним підходам:

— орієнтація на конкретного споживача;

— розробка та використання проривних інформаційних технологій;

— створення умов для використання космічних технологій в інших галузях економіки, комерціалізації космічної діяльності;

— багатопланове міжнародне співробітництво;

— залучення додаткових позабюджетних джерел фінансування.

Цільова програма «Дистанційне зондування Землі» спрямована на виконання таких основних завдань:

— забезпечення супутниковою інформацією органів державної влади для підтримки прийняття рішень у сферах управління та безпеки;

— участь у вирішенні загальнодержавних завдань із моніторингу ресурсів раціонального природокористування, прогнозування техногенних та природних катаклізмів;

— розвиток міжнародного співробітництва в галузі ДЗЗ для вирішення глобальних та національних проблем шляхом обміну супутниковою інформацією, участі у міжнародних програмах досліджень Землі;

— розробка нових апаратних та програмних засобів ДЗЗ, нових інформаційних технологій, наземної інфраструктури з метою виходу українських підприємств на міжнародні ринки космічних послуг.

Реалізація діяльності в галузі ДЗЗ, ефективність використання одержаних матеріалів і подальшого розвитку залежать від наявності повної нормативно-технічної бази, адаптованої до національних та міждержавних умов і правил.

На цей час значна частина нормативно-технічних документів галузі знаходиться на стадії завершення розробки або галузевого випробування, притому вони залишаються недостатньо адаптованими до міжнародних норм і правил. Виходячи з цього, розробка, розвиток, вдосконалення та впровадження нормативно-технічних документів щодо космічної діяльності залишаються важливими, і їх необхідно продовжити.

Для ефективного розвитку космічних комплексів ДЗЗ необхідні системні дослідження з метою забезпечення розробки і модернізації цих комплексів, які передбачають аналіз технічних і експлуатаційних вимог до перспективних комплексів, можливих напрямків розвитку носіїв, космічних апаратів та їх систем. Це дозволить адекватно оцінювати технічний рівень існуючих і створюваних українських носіїв і апаратів, визначати перспективні напрямки модернізації, підвищувати їх конкурентоспроможність з урахуванням міжнародних вимог.

Системні дослідження повинні включати аналіз стану та прогноз розвитку супутникових послуг, розробки відповідного методичного та інформаційного забезпечення.

Реалізація національної програми спостереження Землі з космосу «Січ» є принциповим кроком у забезпеченні екологічної безпеки, піднесенні на якісно новий рівень природокористування, землеробства, прогнозу погоди, геологорозвідки, моніторингу великомасштабних процесів на суходолі та морській поверхні. Зокрема, будуть розширені такі можливості:

— забезпечення необхідною супутниковою інформацією державних органів для підтримки прийняття рішень у кризових ситуаціях;

— забезпечення замовників знімками поверхні Землі;

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 35—36

— екологічний моніторинг довкілля;
— оцінка стану агроземельних ресурсів та ін.

Розвиток космічної науки в галузі ДЗЗ є однією з необхідних умов підтримки загального науково-технологічного рівня держави, міжнародної співпраці у масштабних та престижних космічних проектах.

В результаті підготовки та виконання наукових проектів будуть отримані нові фундаментальні дані щодо будови та розвитку нашої планети, про закономірності розміщення на ній родовищ корисних копалин, особливості енергомасообміну в геосферах Землі та ін.

Усе це призведе до поліпшення якості життя громадян країни, створення умов для значного підвищення рівня професійної підготовки національних наукових кадрів, розширення їх контактів з зарубіжними науковцями, інтеграції українських вчених до світової наукової спільноти.

Спільно дбаємо про Київ

М. С. Щепець

ДКП «Плесо», Постійна комісія з питань техногенно-екологічної безпеки при Київській міській державній адміністрації

Плідна співпраця Київської міської державної адміністрації (КМДА) та ЦАКДЗ започаткована з часу заснування Центру. За десятиріччя багато зроблено для вирішення екологічних проблем красеня-Києва.

Реалізуючи основний принцип екологічної конференції ООН (1992 р.): «Думай глобально — дій локально», фахівці Центру на основі сучасного картографічного моделювання, використання багатозональних аерокосмічних знімків, відповідних комп'ютерних програм та впровадження методичних прийомів геоекологічного дешифрування здійснили поступовий перехід від оглядово-регіональних досліджень України в цілому до вивчення екологічних проблем міст Києва, Запоріжжя, Херсона та ін. З 1993 року спільними зусиллями КМДА та Центру розпочато роботу зі створення серії карт «Київ. Навколишнє середовище (з використанням аерокосмічних матеріалів)» масштабу 1:50 000. Результати досліджень відображають стан і розвиток різних складових екосистеми міста. Вони дають можливість об'єктивно оцінити стан навколишнього середовища, рівень техногенного навантаження, прослідкувати шляхи забруднення довкілля, і тому органічно увійшли до Програми соціально-економічного та культурного розвитку Києва на період до 2010 р. та використані при розробці нового генерального плану столиці.

На основі значного досвіду, необхідного банку аерокосмічної інформації та геологічних даних було складено карту розвитку сучасних екзогенних процесів на території Києва в масштабі 1:25 000. Ця карта стала базовою в подальших дослідженнях окремих ділянок міста, що зазнають дії небезпечних геологічних процесів і потребують термінового інженерного захисту.

Співпраця відбувається в напруженому режимі оперативного аналізу ділянок геоекологічного ризику з виданням необхідних рекомендацій з мінімізації та стабілізації розвитку небезпечних явищ: підтоплення грунтовими водами, зсувів грунтових мас та інших. Так, добре відомий випадок зсуву грунтових мас навколо багатоповерхового житлового будинку по вулиці Кудрявській в липні 1997 року вимагав термінових рекомендацій щодо ліквідації причин і наслідків небезпечного геологічного процесу. Провідними фахівцями Центру та Інституту геологічних наук в стислі строки було розроблено необхідні рекомендації з інженерного захисту зазначеного будинку і тільки після висновку вчених мешканців було повернуто на постійне проживання в будинок. Подібних прикладів можна перераховувати цілий ряд.

Зазначені оперативні роботи виконуються поряд з плановими науково-впроваджувальними розробками з геоекології міста, які проводяться у відповідності з довгостроковою Програмою взаємодії КМДА та НАН України, затвердженою міським головою О. О. Омельченком та Президентом НАН України Б. Є. Патоном.

Результати цієї співпраці можна побачити у виданих атласах «Україна з космосу» та «Космос—Україні» (під редакцією В. І. Ляльки та О. Д. Федоровського), де представлене геоекологічне дешифрування сучасних мультиспектральних космічних знімків Київської міської агломерації.

Напружену науково-впроваджувальну роботу з екологічних досліджень столиці виконують висо-

© М. С. ЩЕПЕЦЬ, 2002

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 36—40

кокваліфіковані науковці та фахівці різних спеціальностей; координує роботу протягом десятиріччя з притаманним йому творчим запалом науковий співробітник Центру О. М. Теременко.

Наступним доробком плідної співпраці стане атлас «Київ з космосу», на який чекають спеціалісти міського господарства, студенти та школярі.

Авіаційний комплекс АКДЗ-30 дистанційного зондування природного середовища

В. М. Цимбал[1], В. І. Лялько[2], О. С. Курекін[1], О. С. Гавриленко[1]

[1]Центр радіофізичного зондування Землі ім. А. І. Калмикова НАН та НКА України, Харків

[2]Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Київ

В роботі аналізуються особливості побудови та інформаційні можливості авіаційного комплексу дистанційного зондування природного середовища АКДЗ-30, який створено спільними зусиллями фахівців ЦРЗЗ ім. А. І. Калмикова та ЦАКДЗ. Комплекс складається з узгоджених за своїми характеристиками недорогих систем — двочастотної радіолокаційної (РБО 8-мм діапазону та РСА 23-см діапазону) системи, сканера інфрачервоного діапазону, багатоканального відеоспектрометра, цифрової відеокамери, засобів глобального позиціювання, бортової та наземної обробки та інтерпретації даних. Комплекс розміщено на борту літака АН-30 МНС України та призначено для вирішення широкого кола практичних та наукових завдань, і перш за все прогнозування, попередження та моніторингу наслідків природних і антропогенних критичних ситуацій та катастроф, контролю стану природного середовища, пошуку проявів корисних копалин тощо.

На поточний час в світі створена значна кількість високотехнологічних та досить ефективних радіолокаційних, інфрачервоних та оптичних систем дистанційного зондування Землі як з космічних, так і з авіаційних носіїв. Такі системи добре відомі. При цьому космічні та авіаційні системи не конкурують між собою, а в значній мірі доповнюють одна одну. Так, космічні засоби дистанційного зондування мають корисну спроможність глобального спостереження — вони дозволяють миттєво оглянути великі важкодосяжні та віддалені території, що дозволяє отримувати «миттєві відбитки» різноманітних глобальних явищ на океанській поверхні, в атмосфері та на суходолі.

В той же час авіаційні системи дозволяють організувати на обмежених територіях багаторазові та регулярні спостереження, що особливо необхідно при контролі швидкоплинучих процесів природних та техногенних катастроф (при розлитті нафтопродуктів на морській поверхні, повенях, лісових пожежах і т. ін.). Крім цього, зондування з літака дозволяє оперативно оптимізувати умови зйомки по висоті, напрямку, кутах освітлення тощо.

Незважаючи на абсолютно очевидні переваги новітніх засобів авіаційного дистанційного зондування, наприклад радіолокаційних, їх використання до сих пір обмежено в основному рамками дослідних проектів, що не дозволяє в повній мірі реалізувати на практиці їхні потенційні корисні можливості. Це викликано рядом причин, серед яких як нерозуміння більшістю практичних споживачів реальних можливостей цих засобів, так і до значної міри висока вартість отримуваних даних. Наприклад, висока вартість даних більшості сучасних авіаційних радіолокаційних систем дистанційного зондування обумовлюється як високою вартістю виготовлення цих технічно складних засобів, так і значними витратами на експлуатацію авіаційних носіїв. Таким чином, нам здається неможливим суттєве розширення використання даних радіолокаційного дистанційного зондування і, відповідно, досягнення високої економічної ефективності авіаційних систем, без значного зменшення цих витрат.

Для забезпечення привабливої для практичних споживачів вартості даних дистанційного зондування дуже важливо використовувати мінімально достатні за своїм складом недорогі комплекси апаратних засобів зондування, строго узгоджені за своїми можливостями з завданнями, що вирішуються. Ці засоби повинні мати можливість успішно функціювати при розміщенні на невеликих літаках, витрати на експлуатацію яких значно менші, ніж у більших літаків.

© В. М. ЦИМБАЛ, В. І. ЛЯЛЬКО, О. С. КУРЕКІН, О. С. ГАВРИЛЕНКО, 2002

Фахівці ЦРЗЗ ім. А. І. Калмикова у співдружності з фахівцями ЦАКДЗ створили авіаційний багатопрофільний комплекс дистанційного зондування АКДЗ-30, який побудован за таким мінімально достатнім принципом та забезпечує невисоку вартість отримуваних даних.

ОСОБЛИВОСТІ КОМПЛЕКСУ АКДЗ-30

До складу апаратних засобів авіаційного комплексу дистанційного зондування природного середовища входять: двочастотна радіолокаційна система, що складається з радіолокатора бокового огляду з реальною апертурою антени РБО 8-мм діапазону та радіолокатора бокового огляду 23-см діапазону з синтезуванням апертури антени РСА, скануючий радіометр інфрачервоного діапазону, трасовий багатоканальний спектрометр оптичного діапазону, аерофотокамери та відеокамера, система бортової обробки, накопичування, інтерпретації та відображення інформації, а також навігаційний приймач системи GPS. Комплекс АКДЗ-30 орієнтовано на вирішення широкого кола наукових і практичних завдань, перш за все на оперативне виявлення провісників та моніторинг проявів різноманітних природних і техногенних катастроф, критичних ситуацій (таких як водопілля, розлиття на водній поверхні нафтопродуктів, льодові затори, великомасштабні пожежі і т. ін.), а також пошук проявів корисних копалин, виявлення суден-порушників кордонів морських економічних і промислових зон, та ін. Комплекс розміщено на борту літака української розробки АН-30, який має відносно невеликі експлуатаційні витрати і при цьому добрі льотні характеристики.

СИСТЕМИ КОМПЛЕКСУ АКДЗ-30

Основні параметри систем дистанційного зондування комплексу АКДЗ-30 наведені в табл. 1—3.

Основною особливістю радіолокаційної системи комплексу АКДЗ-30 є синхронне використання радіолокатора бокового огляду з реальною апертурою антени РБО 8-мм діапазону та радіолокатора з синтезуванням апертури антени РСА 23-см діапазону, які мають досить близькі за потенціалом та просторовим розрізненням характеристики, що значно розширює інформаційні можливості всієї системи. При цьому РБО 8-мм діапазону використовує тільки вертикальну поляризацію сигналів, а РСА 23-см діапазону може використовувати будь-які комбінації поляризацій.

Інформація обох радіолокаторів обробляється безпосередньо на борту літака в реальному часі, на борту проводиться накопичення, візуалізація отриманих зображень, а також проводиться перезапис інформації на додатковий бортовий компьютер для оперативної інтерпретації даних, що особливо важливо для моніторингу швидкоплинучих катастро-

Таблиця 1. Основні параметри радіолокаційної системи авіаційного комплексу дистанційного зондування АКДЗ-30

Параметр	λ = 8 мм	λ = 23 см
Тип радіолокатора	РБО	РСА
Поляризація сигналів	ВВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
Потужність імпульсу, що передається	16 кВт	0.5 кВт
Тривалість імпульсу, що передається	43 нс	10 мкс
Діапазон робочих висот	500—7000 м	
Рабоча смуга огляду	15 км	
Середнє просторове розрізнення	7—10 м	
Гранична ЕПР, що виявляється	0.03 м^2	0.025 м^2
Обробка інформації	цифрова на борту	
Відображення інформації	на моніторі IBM PC	
Загальна маса	85 кг	70 кг
Загальна потужність	1 КВт	1 КВт
Обслуговуючий персонал	1 оператор	1 оператор

Таблиця 2. Основні характеристики аерофотоапаратів, що використовуються в складі комплексу дистанційного зондування АКДЗ-30

Параметри	АФА-41/7.5	АФА-41/10	АФА-41/20
Тип об'єктива	Ортогон-1	МРО-2	Оріон-20
Фокусна відстань	75 мм	100 мм	200 мм
Відносний отвір	1:6.8	1:8	1:6.3—1:22
Кут поля зору	119°	104°	65°
Ширина захвату (H = 6000 м)	14.4 км	10.8 км	5.4 км
Протяжність маршруту (перекривання 60 %, H = 6000 м)	1612 км	1210 км	605 км

Таблиця 3. Основні характеристики сканеру інфрачервоного діапазону «Малахіт-1»

Тангенціальна швидкість W/H, с$^{-1}$	0.05—0.36
Огляд на місцевості	3.4H
Миттєве поле зору, рад	$1.75 \cdot 10^{-3}$
Спектральний діапазон, мкм	8—14
Енергетичне розрізнення на рівні 20 °С, при відношенні сигналу до шуму, рівному 1 °С	0.1—0.15
Швидкість обертання скануючої призми, об/хв	2250
Частота строк, Гц	150
Полоса пропускання електронного тракту	1 Гц—150.0 кГц
Фотоплівка	Тип 42Л
Швидкість протягу плівки, мм/с	0.8—7.2

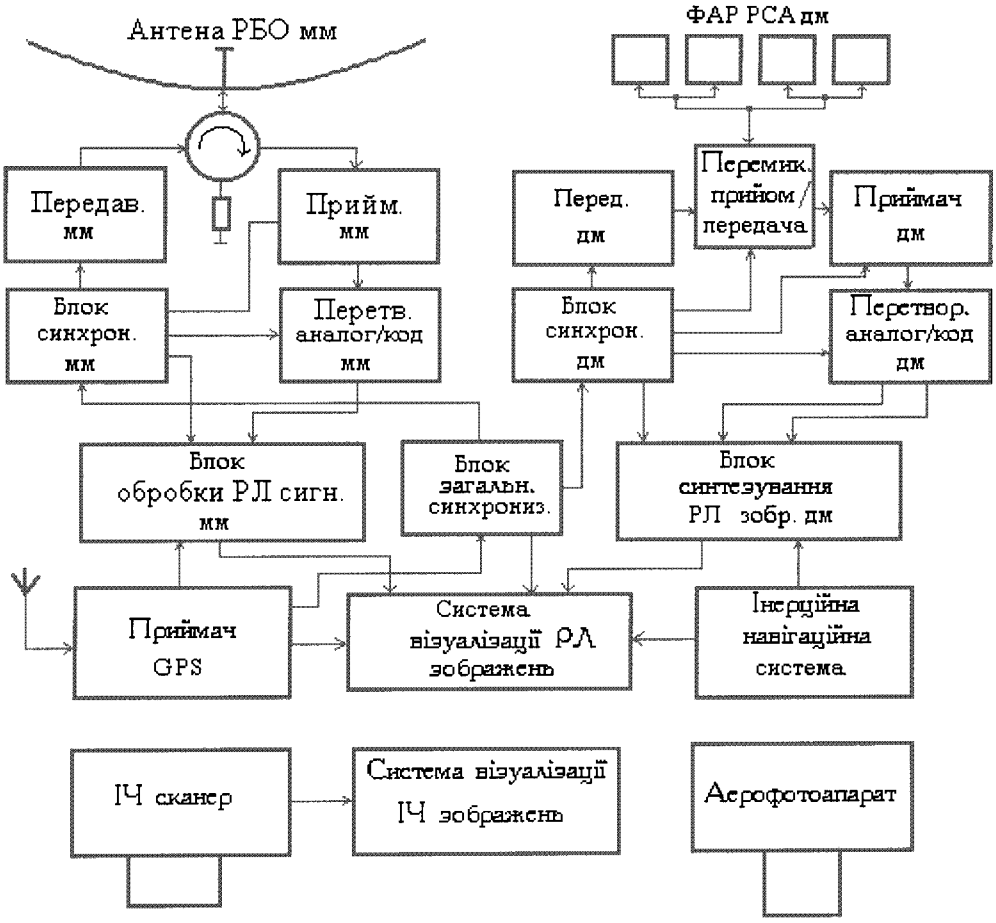


Рис. 1. Структурна схема систем дистанційного зондування комплексу АКДЗ-30

фічних процесів. На рис. 1 наведено структурну схему систем дистанційного зондування комплексу АКДЗ-30.

Інформаційні можливості комплексу дистанційного зондування АКДЗ-30. На поточний момент фахівці ЦРЗЗ ім. А. І. Калмикова та ЦАКДЗ завершили створення та випробування першої черги комплексу АКДЗ-30, до складу якої входить РБО 8-мм діапазону, ІЧ-сканер «Малахіт-1», аерофотоапарати, відеоспектрометр та відеокамера. Найближчим часом буде завершено створення РСА 23-см діапазону, після чого комплекс буде ним додатково обладнаний. Крім цього, можливе додаткове обладнання комплексу РСА 215-см діапазону замість РСА 23-см діапазону. Цей варіант обладнання орієнтований в першу чергу на використання в країнах з сухим грунтом, де у повній мірі можна використати ефект підповерхневого зондування ультракороткохвильовим радаром [1].

Було проведено кілька комплексних випробувань комплексу АКДЗ-30 в літніх та зимових умовах. На рис. 2 наведено фотографії АКДЗ-30, а на рис. 3 — приклад комбінованого радіолокаційно-інфрачервоно-відео-зображення місцевості в районі с. Добре Озеро (Ніжинського району, Чернігівської області), отримане влітку 2001 р. за допомогою комплексу АКДЗ-30.

ПІСЛЯМОВА

Вже перші випробування першої черги авіаційного комплексу дистанційного зондування природного середовища АКДЗ-30 переконливо довели його великі інформаційні можливості та перспективність його використання для попередження природних та антропогенних катастроф, екологічного моніторингу тощо. Україна отримала ефективний універсальний інструмент дистанційного зондування.

1. Kalmykov A., Tsymbal V., et al. The Two-Frequency Multipolarisation L/VHF Airborne SAR for Subsurface Sensing // AEU Int. Electron. Commun. 50.—1996.—N 2.—P. 145—149.

Рис. 2. Зовнішній вигляд літака АН-30 з установленим на ньому комплексом АКДЗ-30 (а); внутрішній вигляд салону з робочими місцями операторів (б); ІЧ-сканер «Малахіт-1» та аерофотоаппарат, змонтовані в фотолюках літака (в); приймально-передавальний блок РБО (г)

Рис. 3. Комбіноване зображення (складене з радіолокаційного, інфрачервоного та відеозображень) місцевості біля с. Добре Озеро (Ніжинський район, Чернігівська обл.), отримане за допомогою комплексу АКДЗ-30 влітку 2001 р. На радіолокаційному зображенні добре видно прояви на поверхні грунту підповерхневої води (маленькі стрілки), а також рослинність (навіть відрізняється стерня з різним рівнем скошування). В місці, поміченому на ІЧ-зображенні довгою стрілкою, спостерігається небезпечне підтоплення грунту, яке простягається під залізничну колію

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 41—51

Стан, перспективи та проблеми ринку послуг дистанційного зондування Землі з космосу

В. І. Волошин[1], **В. Й. Драновський**[2], **Є. І. Бушуєв**[1]

[1]Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

[2]Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СВІТОВОГО РИНКУ ПОСЛУГ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) забезпечує унікальні можливості оперативного збору даних у глобальному масштабі з високим просторовим, спектральним і часовим розрізненням, що і визначає великі інформаційні можливості космічних систем, можливість їхнього військового застосування і потенційну економічну ефективність. Дистанційне зондування Землі на комерційній основі перетворюється (за пріоритетом і обсягом) в другу після супутникових засобів зв'язку область діяльності в космосі.

Основні сегменти ринку космічних послуг: одержання, обробка та надання даних природо-ресурсного й екологічного моніторингу Землі, включаючи метеодані, постачання космічних апаратів (КА), платформ, наземного устаткування.

Космічні метеосистеми чи окремі КА експлуатуються у США (NOAA, GOES, DMSP), Росії («Метеор», «Электро»), Китаї (FY-1, FY-2), Японії (GMS), Індії («Insat») і європейській організації EUMETSAT («Meteosat»). Обмін метеоданими здійснюється в рамках угод про міжнародні метеоцентри і банки даних Всесвітньої служби погоди. Усі метеосистеми є системами подвійного призначення. Намічається тенденція створення регіональних метеосистем і малих спеціалізованих КА для спостереження за окремими метеоявищами на додаток до сформованих систем.

Ринок природо-ресурсного й екологічного моніторингу надає послуги з одержання, обробки та поширення інформації дистанційного зондування Землі із забезпеченням необхідних масштабів огляду, спектральних діапазонів спостереження, періодичності та регулярності зйомки, оперативності доставки інформації, просторового й спектрального розрізнення.

Найпопулярнішими діючими космічними системами природо-ресурсного та екологічного моніторингу є: «Spot» (Франція), «Landsat», EOS (США), IRS (Індія), ERS (Європейське космічне агентство), «Radarsat» (Канада), «Ресурс-О», «Ресурс-Ф» (Росія), «Океан-О1», «Океан-О» (Україна—Росія).

Зазначені системи забезпечують просторове розрізнення на рівні 5—50 м і орієнтовані в основному на потреби науковців, урядових і державних структур, тобто в інтересах усього суспільства, а тому практично цілком (на 90—100 %) дотуються урядами. Показовим у цьому плані є загальноприйнятий поріг розрізнення в 10 м для систем такого класу, як найбільш високе розрізнення, необхідне для міжнародних програм по контролю «здоров'я Землі». Космічні системи вищого розрізнення (1—5 м), що з'явилися в 1999—2000 рр., і ті, що заплановані на найближчі роки, орієнтовані на локальні зйомки і є головним чином чисто комерційними.

При цьому кожне підприємство приватного сектору проводить свою ринкову політику і вибирає просторові, спектральні й часові характеристики зйомки такими, щоб створити комерційно життєздатні супутникові системи. У результаті для комерційних систем просторове розрізнення обране 0.8—1.0 м у панхроматичному каналі та від 3.3 до 4.0 м у багатоспектральних каналах, як найбільш ймовірна комбінація, у даний час необхідна для задоволення ринку.

Однак деякі урядові системи з високим розрізненням, типу «Cartosat» (Індія) і «Helios» (Франція) потенційно можуть стати комерційно конкурентноздатними.

Щорічна вартість продукції дистанційного зондування Землі, що надійде на ринок у найближчі 5—10 років, оцінюється від 3.5 до 12 млрд дол. США. Щорічний ріст обсягу продажу продукції дистанційного зондування оцінюється на рівні 15—20 %. Маркетингова стратегія більшості західних програм зі створення комерційних систем ДЗЗ грунтується на експансії в область високого просторового розрізнення на рівні 0.5—1 м. «Spot Image»

© В. І. ВОЛОШИН, В. Й. ДРАНОВСЬКИЙ, Е. І. БУШУЄВ, 2002

Таблиця 1. Основні характеристики КА спостереження Землі високого розрізнення

Країна-власник	Найменування	Дата запуску	Маса, кг	Розрізнення/Смуга огляду
Австралія	ARIES 1	2001	450	PAN 10 м/15 км MS 30 м/15 км
Алжир	DMC (Alsat)	2003	100	PAN 2.5 м MS 5 м
Аргентина, Бразилія	SABIA-3	2003	300	MS 6-8 м/400 км
Великобританія	DMC («Topsat») (5 КА)	2003	400	PAN 2.5 м MS 5 м
Німеччина	«Rapid Eye» (4 КА)	2002	380	MS 6.5 м
Ізраїль, Німеччина	«David»	2000	180	MS 5 м/30 км
Ізраїль, США	EROS A (2 КА)	2000, 2001	280	PAN 1.8 м/12.5 км
	EROS B (6 КА)	2001—2004	350	PAN 0.8 м, MS 3.28 м/16.4 км
Індія	IRS-2A	2000	1500	PAN 5 і 10 м/70 км
	IRS-2B	2004	1150	PAN 2.5 м
	IRS-3	2005	1150	PAN 1 м
	«Cartosat-2»	2003	1350	PAN 2.5 м/30 км, MS 10 м/40 км
	«Cartosat-2A»	2003		PAN 1 м/30 км, MS 10 м/40 км
	«Cartosat-2B»	2008		
	«Cartosat-2C»	2010		
	«Resurcesat-1»	2000	1350	MS 10 м/40 км
	«Resurcesat-2»	2003		
Італія	«Sky-Med Cosmo» (7 КА)	2001—2007	600	PAN 1 і 2.5 м/15 км, MS 5 м/15 км, SAR 1 м/23—43 км
Канада	«Radarsat-2»	2003	1815	SAR 3-100 м/10—500 км
Китай, Бразилія	CBERS-2	2001	1450	PAN 20 м/120 км, MS 20 м і 160 м/120 км
Китай, Бразилія	CBERS-3	2003		PAN 3 м
Китай	CEMD SAR 1, CEMD SAR 2	2003	3000	SAR 4-25 м/25—125 км
Пакистан	«Badr-B»	2000	70	MS 10-20 м/205 км
Росія	«Ресурс-ДК»	«Монитор» (система малих КА)	2001, 2001—2006	6300
США	GDE	2001	400	PAN 1 м/15 км
	«Ikonos»	2000	817	PAN 1 м/11 км, MS 4 м/11 км
	«Resourse 21» (4)	2001	400	10, 20, 100 м/205 км
	NEMO	2000	805	PAN 5 м/30 км, HS 10 м
	«OrbView-3»	2001	300	PAN 1 і 2 м/4 і 8 км, MS 4 м/8 км
	«OrbView-4»	2001	360	PAN 1 і 2 м/4 і 8 км, MS 4 м/8 км, HS 8 м
	«Quick Bird-2»	2001	400	PAN 0.8 м/21 км, MS 4.5 м/21 км
	EO (5 КА)	2000—2003	300	PAN 10 м, MS 30 м
	«Radar-1»	2001	500	SAR 1 м
	GEROS (4)	2001—2002	50	PAN, MS 10 м
Тайвань	«Rocsat-2»	2002	500	PAN 2 м
Франція	«Spot-3S-1»	2003	500	PAN 2-2.5 м/40 км
	«Spot-3S-2»	2005		
	«Spot-5»	2001	2600	PAN 2.5 м і 5 м/117 км, MS 10 м/117 км
	«Phleades»	2006	800	PAN 1 м, SAR 1-3 м
	XSTAR (2)	2001—2002	—	HS 20 м/320 км
Японія	«Ricesat»	2005	400	10—20 м
	ALOS-1	2002	3850	PAN 2.5 м/35 км
	ALOS-2	2005		SAR 10 і 100 м/70 і 360 км

Умовні позначення: PAN — панхроматичне (чорно-біле); MS — багатоспекральне (3—10 каналів); HS — гіперспектральне (більш 10 каналів); SAR — радіолокаційне.

потреби ринку зображень до 2006 р. оцінює в такий спосіб: 65 % — з розрізненням менше 1 м; 25 % — 1 м; 7 % — 2-3 м; 3 % — гірше 5 м.

Очікується, що супутники з високим розрізненням займуть ринок авіазйомок. Перші комерційні супутники з розрізненням від 0.8 до 1.0 м перекривають приблизно 50 % ринку зображень з літака. Цифрове супутникове зображення має перевагу у порівнянні з аерофотоплівкою через високу здатність до повторної зйомки і 11-бітовий формат подання даних, що особливо важливо при низьких рівнях освітленості. Зображення з дуже високим розрізненням (< 0.3 м), очевидно, залишаться за аерофотозйомками, що використовують нові цифрові камери розробки Німеччини, Японії і США. У космічної й авіаційної цифрової індустрії є сильний потенціал для спільної діяльності із забезпечення користувачів даними ДЗЗ.

Споживачами послуг ринку моніторингу Землі й океану є державні відомства, організації науково-дослідного характеру, організації екологічного контролю; національні військові й розвідувальні служби; агропромислові, геологорозвідувальні, будівельні, транспортні, страхові, туристичні фірми; урядові і військові структури тих держав, що не можуть розраховувати на допомогу провідних космічних держав в області космічної розвідки; громадські організації, засоби масової інформації.

Постачальники ринку послуг природо-ресурсного й екологічного моніторингу в залежності від форми власності на орбітальні та наземні засоби одержання космічної інформації:

— державні структури — власники й оператори космічних систем, переважно дослідницьких, створених на бюджетні засоби;

— приватні фірми, яким передані права на комерційну експлуатацію державних космічних систем;

— приватні фірми — власники й оператори космічних систем, створених на позабюджетні засоби;

— приватні фірми — співвласники й оператори космічних систем, переважно подвійного призначення, створених на основі часткового бюджетного і приватного фінансування.

Провідні фірми — постачальники комерційної космічної інформації дистанційного зондування Землі: «Spot Image» (Франція), «Radarsat International» (Канада), «MacDonald Dettwiller & Associates» (Канада), «Earth Watch Inc.» (США), «Orbital Imaging Corp. (Orbimage)» (США), «Space Imaging Eosat» (США), «ImageSat Int» (колишня «West Indian Space Ltd», Ізраїль, США), «Совинформспутник» (Росія).

В даний час попит на інформацію дистанційного зондування росте в основному за рахунок розвідувальних і військових відомств, а також органів державного управління.

У майбутньому фірми-постачальники космічної інформації орієнтуються на непрофесійних масових споживачів, що не є технічними фахівцями. Збільшення попиту на інформацію ДЗЗ із боку таких споживачів обумовлене насамперед появою високопродуктивної персональної обчислювальної техніки і відповідних програмних засобів, а також удосконаленням і розширенням сфери застосування геоінформаційних систем, основним джерелом даних для яких є матеріали космічної зйомки. Найперспективніші ті сегменти ринку космічних послуг, що є найближчими до кінцевого, масового споживача, адже саме тут реалізується головна перевага космічних технологій — глобальність і можливість багатодисциплінарного застосування даних.

Раніше створені системи ДЗЗ, орієнтовані на централізоване обслуговування великих, переважно державних замовників інформації, не відповідають повною мірою змінам споживчого ринку. У зв'язку з цим зростаючі надії покладаються на перспективні комерційні системи ДЗЗ на базі недорогих малих космічних апаратів «Ikonos», «OrbView», «Quick Bird», EROS і ін.

Розробки КА спостереження Землі для одержання видових і радіолокаційних зображень із розрізненням порядку 1—5 м ведуться у Німеччині, Індії, Італії, Ізраїлі, Канаді, Росії, США, Франції, Півд. Кореї, Японії й інших країнах.

У табл. 1 приведені основні характеристики КА спостереження Землі високого розрізнення, планованих до запуску після 2000 р.

За прогнозом американської компанії «Mitretek Systems» до 2003 р. на навколоземній орбіті буде знаходитися в експлуатації 24 супутника дистанційного зондування Землі, з них 14 супутників із установленою на них оптичною апаратурою зйомки поверхні Землі з розрізненням 1 м [1, 2], що відповідає даним таблиці, складеної авторами.

Експерти прогнозують збільшення обсягів ринку зображень супутникових систем високого розрізнення по наступних основних напрямках діяльності: військова розвідка; економічна розвідка; створення цифрових карт місцевості; керування ресурсами та планування в урбанізованих і прибережних зонах; планування телекомунікаційних і транспортних систем.

Положення на ринку зображень середнього розрізнення більш-менш стабільно. Зберігається лідируюче положення французької фірми «Spot Image» (порядку 60 % світового обсягу продажу). Однак надходження зображень з індійських КА IRS із розрізненням, подібним до КА «Spot», введення в експлуатацію американських КА «Landsat-7» і «Terra», бразильсько-китайської системи CBERS, очікувані запуски КА ADEOS-2, ALOS-1 (Японія), «Ресурс-ДК» (Росія) можуть загострити ситуацію.

Обсяги експорту космічних апаратів, платформ, апаратури ДЗЗ, наземних засобів прийому й обробки мають тенденцію до розширення, чому сприяє бажання багатьох країн мати незалежні засоби спостереження Землі подвійного призначення. Якщо провідні космічні держави спочатку розвивали космічну розвідку і тільки згодом стали розвивати ДЗЗ в інтересах науки і народного господарства, то зараз багато країн до військового використання космосу йдуть від створення систем спостереження Землі подвійного призначення. Динаміка галузі визначається попитом на малі КА видової й радіолокаційної зйомки, що, у свою чергу, залежить від успіху комерційних систем ДЗЗ. Основними виробниками платформ для КА спостереження Землі є «Aerospatiale Espace & Defense», «Alenia Spazio S. p.

A.», «Ball Aerospace and Technologies Corp.», «Dornier Satellitensysteme Gmb», «Hughes», «Lockheed Martin Astro Space», «Matra Marconi Space», «Orbital Sciences Corporation», «Surrey Satellite Technology Ltd».

Постачальники КА для одержання високоякісних зображень, як правило, володіють компаніями-операторами космічних послуг. Так, «Ball Aerospace Systems» контролює «Earth Watch Inc», «Orbital Sciences Corporation» контролює «Orbital Imaging Corp. (Orbimage)», «Lockheed Martin Missile and Space» контролює «Space Imaging Eosat», «Boeing Commercial Space Development Company» контролює «Space Remote Sensing Center» (система «Resource-21»), «Israel Aircraft Industries Ltd.» контролює «ImageSat Int». Це прагнення лідерів галузі одержувати максимальні прибутки.

Типовою стратегією проникнення на ринок є укладання контрактів на постачання інформації чи угод про обмін на ранніх стадіях розробки космічних систем.

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ КОНКУРЕНЦІЇ

У конкурентній боротьбі розробників космічних систем до дійсного часу досягнуто істотного поліпшення інформаційних можливостей і технічних характеристик цивільних космічних систем спостереження Землі, у першу чергу за рахунок доведення просторової роздільної здатності до 1 м і менше, застосування багатозональної і гіперспектральної бортової апаратури і всепогодних радіолокаційних засобів, скорочення термінів розробки і виготовлення КА до 1—2 років, переходу до створення малих КА і формування з них багатосупутникових систем ДЗЗ.

Так, на ринку з'явилася супутникова знімальна апаратура метрового розрізнення корпорації «Kodak» [3].

Підвищення просторового розрізнення і точності географічної прив'язки дозволяє одержувати карти масштабу до 1:2500 по якості на рівні аерофотозйомки.

Важливим фактором у створенні в короткий термін дешевих КА є уніфікація бортової цільової і службової апаратури, використання універсальних платформ. Набуває розвитку тенденція практичного переходу до використання малорозмірних космічних апаратів масою 1000—100 кг і менш, що оснащуються одним цільовим приладом. Ведуться роботи по створенню наносупутників для застосування у складі угруповань КА чисельністю в десятки апаратів. Очікується, що в результаті мініатюризації через 5—10 років можливе широке використання угруповань взаємозалежних наносупутників масою менше 10 кг, а через 10—20 років — масою порядку 1 кг, які зможуть установлювати зв'язок один з одним, обмінюватися інформацією, виконувати різні операції без втручання операторів.

У найближчій перспективі космічні апарати будуть оснащатися автономними системами навігації, що дозволить проводити автоматичне коригування орбіти чи пошук потрібного району і наведення на нього знімальної апаратури. Відпрацьовування таких систем уже проводиться на експериментальних КА.

Дуже перспективна технологія керування зйомкою безпосередньо споживачем. Традиційна технологія передбачає централізований збір заявок від споживачів і закладку програми на зйомку, що обмежує гнучкість системи й оперативність одержання необхідної інформації. Керування зйомкою безпосередньо споживачем (так звана технологія SEE — Space Eyes & Ears) запропоновано українськими вченими й фахівцями ще п'ть років тому [4]. Ця ідея частково реалізована на німецькому супутнику «DLR-Tubsat» («Tubsat-3»), який був запущений 24.05.99 р. і призначений для льотного відпрацьовування системи зйомки земної поверхні за замовленням користувачів [5].

Принципи керування зйомкою споживачем і розподіленого доступу до інформації найповніше реалізуються в ізраїльсько-американському проекті космічної системи спостереження Землі EROS [6]. Послугами цієї системи можуть скористатися клієнти, що бажають здійснювати незалежне супутникове спостереження, але не мають можливості фінансувати свою космічну програму. Клієнт зможе підтримувати автономну експлуатацію виділеного супутника в зоні радіовидимості наземної приймальної станції. Клієнту надається лінія зв'язку із супутником у S-діапазоні, апаратні засоби і програмне забезпечення, що дозволяють вести підготовку і виконання програми зйомки.

З появою супутника в зоні дії наземної станції між супутником і наземною станцією встановлюється зв'язок, і клієнт передає на КА завдання на зйомку в смузі огляду на даному витку і (чи) при наступному проході над наземною приймальною станцією. Бортова апаратура ідентифікує клієнта і санкціонує реалізацію плану зйомки і скидання інформації у режимі реального часу на наземну приймальну станцію.

Ефективність використання систем ДЗЗ у цілому вирішальним образом визначається ефективністю системи розподілу даних. Так, незважаючи на те, що США першими створили експлуатаційну систему ДЗЗ «Landsat», лідируючі позиції на світовому ринку ДЗЗ зайняла Франція, що зуміла організувати експлуатацію своєї системи «Spot» із мак-

симальною увагою до потреб користувачів. Розподільність і різнорідність користувачів даних ДЗЗ є принциповою відмінністю цих систем від систем стратегічної розвідки і навіть систем метеорологічного спостереження.

Ефективний розподіл і використання даних від космічних систем спостереження Землі передбачає рішення різноманітних задач, у тому числі:
— створення розподіленої мережі прийому, обробки і поширення інформації до запуску КА;
— створення національних регіональних центрів тематичної обробки і використання даних дистанційного зондування;
— перехід на використання універсальних приймальних станцій замість спеціалізованих;
— зменшення габаритів антенних систем, створення малих універсальних станцій прийому й обробки супутникових зображень абонентського класу;
— розробка рухливих універсальних наземних приймальних станцій;
— створення банків даних ДЗЗ із системою доступу до масивів високоякісних глобальних карт і зображень, у тому числі і через мережу Internet;
— розробка автоматизованих робочих місць (АРМ) аналітика даних ДЗЗ для оснащення користувачів;
— розробка прикладного програмного забезпечення (ПЗ) обробки зображень, орієнтованого на масовий споживчий ринок (наприклад, віртуальні польоти над тривимірною місцевістю, відеогри);
— навчання і підготовка користувачів.

Так, відповідно до рішення Конгресу США, почата реалізація прикладної програми дослідження Землі RESAC (Regional Earth Science Application Center program), що передбачає створення регіональних центрів використання даних про Землю, що надходять від супутників спостереження Землі. У число задач, розв'язуваних центрами, увійдуть проблеми, пов'язані з місцевими умовами навколишнього середовища, землекористуванням, використанням водних ресурсів, розведенням лісів і сільськогосподарським виробництвом. Центри будуть займатися також вивченням глобальних змін клімату на місцевому рівні.

Під патронажем Управління NASA по дослідженню Землі (NASA's Office of Earth Science) організовано дев'ять консорціумів, до складу яких включені університети, промислові підприємства і представники місцевих адміністрацій. Дев'ять консорціумів, що об'єднали 77 організацій, при фінансуванні на рівні 14 млн дол. США у 1999—2001 р. створять сім центрів RESAC і організують їхню роботу. Крім згаданих центрів, NASA намічає створити ще групу центрів для роботи винятково за сільськогосподарською тематикою. Вже є 160 пропозицій. На створення цих центрів передбачається затратити 2 млн дол. США бюджетних асигнувань.

Кожен центр зосередиться на рішенні місцевих проблем. Так, наприклад, університетський центр у Гранд Фокс (шт. Північна Дакота) використовує дані для вивчення сільськогосподарських проблем, боротьби з бур'янами і посухою, організації лісівництва. Інший центр RESAC, при університеті в Таксоні (шт. Арізона), буде займатися проблемами використання водних ресурсів на південному заході США. Центри RESAC будуть мати можливість звертатися за допомогою комп'ютерів у розподільні центри активного архівування, що створюються по всій країні. Частина виділених NASA засобів буде витрачена на придбання для цих центрів комп'ютерів, закупівлі програмних засобів обробки даних і оплати самих даних.

Передбачається створення центрів RESAC у штатах Арізона, Міннесота, Вісконсін, Каліфорнія, Канзас, Меріленд і в районі Великих озер [7, 8].

В останні роки в Росії були прийняті заходи щодо розширення інфраструктури прийому інформації ДЗЗ і кола її користувачів. У 1996 р. Російське космічне агентство (РКА) доручило Інженерно-технологічному центру «СканЭкс» розробку і випуск малих станцій прийому й обробки супутникових зображень, а також координацію роботи мережі цих станцій. Центром «СканЭкс» була розроблена персональна станція прийому супутникової природо-ресурсної інформації «СканЭР», що забезпечує прийом інформації від сканерів МСУ-Э і МСУ-СК у режимі безпосередньої передачі. Власник такої станції, оснащеної параболічною антеною діаметром 1.6 м, може самостійно одержувати в реальному часі відеоінформацію про райони, що знаходяться в радіусі близько 2000 км від місця перебування станції, й обробляти її на персональному комп'ютері.

Для малих станцій «СканЭР» установлюється можливість до 2006 р. безкоштовного прийому інформації приладу МСУ-СК на регулярній беззаявочній основі. Це дозволяє використовувати в оперативному режимі дані ДЗЗ для рішення різного роду моніторингових задач на регіональному рівні [9].

Опора на регіональні центри видається особливо актуальною для комерційного використання даних ДЗЗ. Створення розподіленої мережі прийому, обробки і поширення інформації вже привело в Росії до різкого зросту числа замовлень на зйомку і розширення застосування космічної відеоінформації в різних галузях народного господарства. В даний час загальне число споживачів складає кілька сотень, і спостерігається розвиток внутрішнього і міжнародного ринку інформації. Так, за даними [10] дотепер в Росії встановлено більш ніж 30 персональних приймальних станцій, а швидкість прийому на станціях такого типу доведена до 150 Мбіт/с.

Позитивні приклади побудови інфраструктур для розподілу і використання даних ДЗЗ є також у Канаді, Англії, Індії, Фінляндії.

Однак у цілому рішення цієї проблеми на національному рівні ще далеке від свого конструктивного втілення навіть для розвитих країн.

За даними роботи [11] урядові програми витратили мільярди доларів на розвиток технологічних ноу-хау супутникових систем ДЗЗ, і у меншій мірі — на просування цифрової технології для переробки даних у кінцевий інформаційний продукт. Нові комерційні компанії дистанційного зондування витрачають сотні мільйонів доларів кожна, щоб побудувати й експлуатувати космічну систему. У меншій мірі, вони будують, здобувають чи співробітничають в області засобів переробки і використання даних (value-added exploitation capabilities). На жаль, космічні компанії недостатньо інформують користувачів даних про те, як вони планують експлуатувати систему і які в них є досягнення із забезпечення потреб користувачів, наприклад алгоритми, автоматизовані робочі місця, способи калібрування, технології швидкої автоматизованої обробки та ін. Таке положення частково пояснюється промисловим змаганням, а також обмеженим розумінням авіакосмічною промисловістю цієї першої лінії користувачів даних, і меншою мірою технічними проблемами.

З іншого боку, є велике міжнародне співтовариство фахівців, котрі щодня обробляють дані ДЗЗ і витягають з них корисну інформацію, але вони не залучені до рішення тих технологічних проблем, з якими їм доведеться зіштовхнутися в майбутньому. Багато хто з них може створювати нові алгоритми і технології обробки стосовно до своїх опорних дисциплін і галузей знань. Це їхній інтерес, тому що це — їхнє майбутнє!

Необхідно забезпечити співробітництво космічної промисловості і перших користувачів даних, що є для обох сторін кращим капіталовкладенням. Образно кажучи, жодна з сторін не повинна заривати свою голову в пісок у чеканні найближчого майбуття.

До кінця 2003 р. в експлуатації очікується 24 комерційних супутники дистанційного зондування. У таких умовах конкуренції успіх супутникового оператора насамперед зв'язаний з організацією мережі наземних приймальних станцій (у виді міжнародного консорціуму), що може вирішити ряд маркетингових і експлуатаційних проблем. ISPRS, уповноважена ООН неурядова організація, пропонує провести спеціальний форум для обговорень цих проблем.

Стратегічна мета для індустрії зображень Землі полягає в тому, щоб постачити просторову інформацією спокушеному споживачеві, якій не піклується про те, як була отримана ця інформація. Хоча традиційними ринками спостереження Землі були прогноз і контроль погоди, картографія, океанографія, а також деякі спеціальні види зйомок, майбутній ринок — **за просторово орієнтованою часовою інформацією**. Вже з'явилася ринкова ніша в секторі транспортних задач (оперативна навігація) з використанням актуальних динамічних карт, отриманих за супутниковими знімками і даними з місцевизначення транспортних засобів, отриманих від глобальних супутникових навігаційних систем. Інший перспективний ринковий сектор — сільське господарство, що використовує своєчасні періодично повторювані зображення.

Застосування даних ДЗЗ безупинно розширюється, і можна чекати, що ця тенденція буде зберігатися й у майбутньому.

Чекання засновані на тім, що, подібно часу, просторовий компонент є загальним виміром до усіх видів діяльності, і тому ця інформація стане всюдисущою і необхідною.

СТАН І ШЛЯХИ РОЗВИТКУ УКРАЇНСЬКОГО РИНКУ ПОСЛУГ ДЗЗ

У загальнодержавній (національній) космічній програмі України спостереженню Землі приділяється значна увага. Так, у 1995 р. запущено перший український супутник «Січ-1», у 1999 р. запущено україно-російський супутник «Океан-О» для комплексних спостережень у видимому, інфрачервоному, і НВЧ-діапазонах спектру. За станом на 01.12.2001 р. ці супутники продовжують функціонувати за цільовим призначенням. Створено наземну інфраструктуру для керування супутником, прийому і попередньої обробки даних спостережень Землі.

У 2003 р. планується запустити модернізований супутник «Січ-1М» з оптичним сканером підвищеного розрізнення (»»30 м), і багатодіапазонним (ВИД, ІЧ, НВЧ) комплексом оглядового спостереження; ведеться проектування космічних систем оптичного і радіолокаційного спостереження з розрізненням 1—8 м із введенням їх в експлуатацію у 2005—2007 рр.

Проте у даний час основним проблемним питанням у розвитку ДЗЗ залишається низька комерційна віддача космічних засобів, що характерно без винятку для всіх сучасних космічних систем. Незважаючи на низьку вартість зйомки одиниці площі і величезних обсягів зібраних даних, питома вага космічної інформації в загальному обсязі вихідної тематичної продукції для споживачів залишається досить низькою — до 10—15 %.

Таке положення визначається наступними факторами.



Рис. 1. Космічна система спостереження Землі

1. Дані дистанційних спостережень є лише електромагнітними образами досліджуваної поверхні і несуть у собі **опосередковану** інформацію про ті явища і процеси, котрі цікавлять кінцевого користувача (агронома, лісника, картографа, будівельника і т. д.). Для витягу потрібної для споживача інформації необхідно проводити досить трудомісткі міждисциплінарні операції щодо тематичного дешифрування знімка з залученням завірочних наземних даних.

У світлі викладеного інфраструктуру космічної системи спостереження Землі можна представити у виді багатошарової піраміди (рис. 1), де кожний із шарів піраміди створює свій товарний інформаційний продукт для передачі нижньому споживчому шару. При цьому структура вартості продукту, переданого кінцевому користувачеві, має вигляд, представлений на рис. 2 (отримано за даними аналізу продукції, що поставляється від ведучих космічних систем ДЗЗ «Landsat», «Spot»). Як видно з рис. 2, інформація, передана з борта КА, є лише сировиною й основна вартість кінцевого продукту (80 %) створюється при наземній обробці.

З метою одержання максимального прибутку від створюваних космічних систем і оволодіння міжнародним ринком ДЗЗ провідні виробники космічних систем створюють розгалужені мережі приймальних станцій, дистриб'юторські мережі, ведуть активну маркетингову політику; витрати досягають 30 % від загальної вартості проекту.

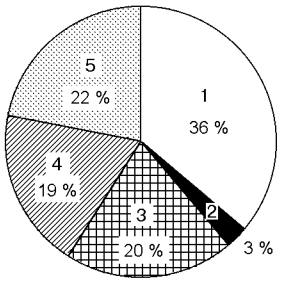


Рис. 2. Структура вартості продуктів ДЗЗ: 1 — інтерпретація, 2 — стандартні атрибути, 3 — дигіталізація (устаткування), 4 — зйомка, 5 — дигіталізація (трудові витрати)

Досвід робіт із КС «Січ-1М», «Океан-О» показав, що питанням просування послуг ДЗЗ на національний і міжнародний ринок не приділялося належної уваги: мережа приймальних станцій обмежувалася територією України і Росії, відсутня дистриб'юторська мережа поширення даних ДЗЗ і переробки цих даних у готовий інформаційний продукт для користувача.

2. Споживачу необхідна інформація «у заданий час і по необхідному регіону». У той же час при існуючій технології планування і проведення зйомки дуже важко забезпечити цю вимогу. Заявка на зйомку повинна подаватися за декілька діб, періодичність проходження супутника над заданим районом також вимірюється в добах (1—15), час доставки інформації споживачу складає від кількох діб до місяців. Для оптичних зйомок ситуація ускладнюється важко прогнозованим станом хмарного покриву. Так, за даними [12], ймовірність успішної зйомки одиночним супутником типу «Landsat» чи «Океан-О» протягом 16-добового циклу складає для території України (рис. 3) усього 0.1. Таким чином, для успішного рішення широкого класу оперативних прикладних задач необхідна корінна перебудова технології планування зйомки, одержання і доставка інформації.

3. Супутник є інструментом для глобального огляду всієї поверхні Землі. Тому його ефективне використання можливе лише при зацікавленості ділових і наукових кіл багатьох країн в одержанні інформації від супутника й організації широкої мережі приймальних станцій у різних географічних регіонах.

4. Більша частина космічної інформації в інтересах наук про Землю, прогнозу погоди і кліматології одержується безкоштовно. Тому ринок ДЗЗ — це ринок, що субсидується.

Рис. 3.

мату, екологічного контролю й ін. взагалі не носить комерційного характеру, і її економічна ефективність оцінюється величиною відверненого збитку.

5. Більша частина користувачів економічно не зацікавлена у створенні технологій рішення тематичних задач з використанням космічної інформації через великі початкові капіталовкладення і тривалі терміни реалізації (5—10 років). У той же час немає організаційних структур, які б інтегрували інтереси різних користувачів і могли б виступити замовниками космічної інформації.

У зв'язку з соціально-економічними реформами істотно змінився і склад користувачів. Дотепер основними акумуляторами інформації в країні були відомства, інформаційні потоки в яких, перш ніж потрапити в регіон, фільтрувалися, коректувалися і навіть спотворювалися. Тому в ізоляції від цього виду інформації виявилося широке коло споживачів на місцях: територіальні управління, наукові і галузеві організації, що безпосередньо займаються геологією, сільським і лісовим господарством та ін.

В даний час основними суб'єктами, зацікавленими в геоінформатизації, стають регіони разом із усією своєю інфраструктурою, контролюючими і керуючими органами влади, підприємствами та організаціями. Ця зміна категорії споживача приводить до розуміння значення і вартості геоінформації.

Економічна самостійність регіонів і зв'язане з нею збільшення відповідальності за подальший їхній розвиток приводить керівників до розуміння дефіциту геоінформації. Цей дефіцит викликаний не стільки недоліком первинної інформації, скільки неможливістю зіставити всі обсяги різнорідних даних, необхідних для рішення задач комплексного аналізу в тісному переплетенні процесів, що охоплюють різні сфери регіонів — від природних до соціально-економічних. І цю задачу можна вирішити тільки шляхом створення регіональних геоінформаційних систем, що повинні мати у своєму розпорядженні сучасні засоби прийому дистанційної інформації, забезпечувати автоматизовану інтерпретацію даних аерокосмічних зйомок, моделювання процесів зміни навколишнього середовища, комп'ютерний синтез тематичних карт, вихід у глобальні обчислювальні мережі і комплексний

Таблиця 2.

Технологія	Область застосування
Авіакосмічні спостереження Землі	Джерело об'єктивних (інструментальних) даних про навколишнє середовище і ресурси. Багатоцільовий і багатодисциплінарний характер даних ДЗЗ припускає можливість їхнього використання як основу для ув'язування розрізнених відомчих систем у єдину регіональну геоінформаційну систему (РГІС)
Координатна прив'язка за даними супутникових навігаційних систем (GPS-технології)	Високоточне й оперативне визначення координат стаціонарних і рухомих об'єктів у єдиній системі координат
Єдина супутникова система передачі інформації (ЄССПІ)	Супутникові і наземні канали передачі даних в ЄССПІ є технічною основою для створення великих ГІС регіонального і міського рівня з розподіленими базами даних
Географічні інформаційні системи (ГІС)	Апаратно-програмні засоби для засвоєння, обробки і візуалізації просторово-орієнтованої інформації



Рис. 4.

аналіз території з оцінкою спрямованості її вимірів.

Перспективні інформаційні технології в прикладних дистанційних дослідженнях Землі з космосу в найближче десятиліття, без сумніву, будуть предметом інтенсивних досліджень і розробок, метою яких є побудова якісно нової системи геоінформаційного забезпечення суспільства.

Указом Президента України «Про заходи щодо використання космічних технологій для інноваційного розвитку економіки держави» № 73 від 06.02.2001 р. затверджена концепція структурної перебудови та інноваційного розвитку космічної галузі. Головною метою структурної перебудови є створення економічно рентабельної і конкурентноздатної галузі, комерціалізація космічної діяльності. Цим же Указом передбачається розробити Міжвідомчу програму впровадження космічних технологій для створення і виготовлення високотехнологічної продукції для потреб внутрішнього ринку і на експорт на 2001—2005 р.

Даний Указ Президента є передумовою для формування нормативно-правової бази, необхідної для створення **якісно нової індустрії геоінформаційного забезпечення суспільства** із широким використанням новітніх супутникових і комп'ютерних технологій у різних напрямках (табл. 2).

Як видно з табл. 2, провідна роль у геоінформаційному забезпеченні належить космічним технологіям. Конструктивне рішення цієї задачі повинне знайти гідне місце в Міжвідомчій програмі і новій Національній космічній програмі України на 2003—2007 рр., які розробляються зараз.

У цьому плані інфраструктура космічної системи геоінформаційного забезпечення (рис. 4) повинна

передбачати можливість створення товарного інформаційного продукту для користувача, а також просування послуг ДЗЗ на міжнародний ринок.

ШЛЯХИ РОЗВИТКУ КОСМІЧНОГО СЕГМЕНТА

При виборі шляхів розвитку космічного сегмента національної системи спостереження Землі «Січ» враховувалися наступні фактори:

1. Необхідність створення власних засобів спостереження, що забезпечують виконання загальнодержавних і оборонних програм.

2. Можливість інтеграції у світову систему спостережень.

3. Використання накопиченого науково-технічного і методичного потенціалу.

Перші українські супутники «Січ-1» і «Океан-О» створювалися й експлуатувалися в тісній кооперації з Російською Федерацією. Надалі необхідно розвивати і поширювати інтеграційні зв'язки і з іншими зацікавленими країнами.

У цьому плані показовою є створювана україноросійська космічна система «Січ-1М», що орієнтована на інтеграцію у світову супутникову мережу спостереження Землі. Обраний склад дослідницької апаратури відповідає сучасному світовому рівню розвитку засобів ДЗЗ і дозволяє вирішувати ряд практичних задач як стосовно спостереження рослинних і грунтових покривів суші, так і по дослідженню Світового океану й атмосфери, контролю гідрологічної і льодової обстановки.

Так, супутник, оснащений комплексом апаратури малого розрізнення (оптичної — МСУ-М і радіолокаційної — РЛС БО), що працює в режимі сполученого кадру й забезпечує глобальні всепогодні спостереження морських і материкових льодів, приводного вітру, атмосферних фронтів, великих нафтових забруднень і ін. Комплекс успішно експлуатувався з 1983 р. на супутниках серії «Океан» і «Січ-1», має досить розвинене методичне і програмне забезпечення. Крім того, КА оснащене новою апаратурою МТВЗА-ОК для комплексного огляду у видимому, інфрачервоному і НВЧ-діапазонах спектру з широкою смугою огляду 2000 км, що забезпечує глобальний характер спостережень. У цілому зазначені прилади успішно доповнюють основні експлуатаційні системи NOAA, Метеор у частині складу параметрів, що вимірюються, і регулярності спостережень.

Установка даних приладів на КА «Січ-1М» дозволяє продовжити важливий ряд спостережень глобального характеру як для рішення поточних задач, так і для досліджень змін клімату по програмі «Global Change».

На супутник встановлено також удосконалений комплект багатоканальної оптичної апаратури високого розрізнення МСУ-ЕУ в складі основного і резервного приладів для підвищення надійності. Досить високе просторове розрізнення (24 м×34 м), можливість перенацілювання в широкій смузі захоплення 700 км, розвинене методичне і програмне забезпечення визначають цю апаратуру як основний експлуатаційний інструмент ДЗЗ, поряд з оптичною апаратурою аналогічного класу, встановленою на супутниках «Spot», IRC, «Ресурс-01». Передача інформації від МСУ-ЕУ передбачена через цифрову радіолінію 8.2 ГГц, загальноприйняту для передачі даних високого розрізнення.

Відмітною ознакою супутника «Січ-1М» є використання широкого набору бортових радіоліній 137 МГц, 1.7 і 8.2 ГГц для передачі інформації, що дозволяють приймати сигнал від супутника практично всьому існуючому парку приймальних станцій на всіх континентах (більш ніж 1000 станцій каналу 137 МГц, понад 200 — 1.7 ГГц і понад 40 — 8.2 ГГц).

Так, у даний час станції 137 МГц і 1.7 ГГц використовуються в основному для прийому інформації від метеорологічних супутників NOAA при середньому завантаженні 1—2 години на добу, що дозволяє при незначних доробках використовувати їх для прийому даних РФА, МТВЗА-ОК і МСУ-М від КА «Січ-1М» і тим самим істотно підвищити віддачу від цих засобів.

Крім того, на платформі супутника «Січ-1М» можуть бути встановлені до 4 мікросупутників (масою до 50 кг кожний), що також надає можливість взаємовигідного співробітництва.

Таким чином, супутник «Січ-1М» має досить високі інформаційні можливості й експортний потенціал як за складом і характеристиками дослідницької апаратури, так (і це головне) за можливостями широкого й оперативного доступу користувачів до інформації.

Вдала реалізація проекту «Січ-1М» дозволить продемонструвати світовій громадськості можливості і достоїнства комплексних досліджень систем, що співробітничають, NOAA + «Метеор» + «Січ-1М», що надалі відкриває перспективу створення вже експлуатаційної системи з декількох малих супутників для безперервних метеорологічних і океанографічних спостережень.

Що стосується космічних апаратів високого розрізнення краще за 10 м, то їхнє створення також доцільно вести на кооперативній основі з зацікавленими закордонними партнерами і власниками аналогічних систем. Це дає можливість:

— скоротити як власні початкові капіталовкладення в розробку КА, так і терміни розробки;

— підвищити регулярність спостережень за рахунок створення кооперативної космічної системи з

Таблиця 3.

Космічний сегмент	Основні задачі	Закордонні аналоги
Система з 4 супутників оптичного багатозонального (гіперспектрального) спостереження з розрізненням 6—8 м	Регулярне спостереження в інтересах сільського, лісового господарства, контролю екологічної обстановки і зон надзвичайних ситуацій (НС)	«Rapid Eye» (4 КА), DMC, «Resource 21» (4 КА), GEROS (4 КА), «Монитор» (8 КА)
Супутники з підвищеним розрізненням 1—4 м	Вибіркове спостереження зон оперативного інтересу користувачів	«Ikonos», EROS, «Quick Bird», «Orb View», «Ресурс-ДК», «Radarsat-2», «Radar-1», «Монитор»
— Оптичне багатозональне спостереження	Багатоспектральна та гіперспектральна зйомка, стереозйомка	
— Радіолокаційне спостереження	Всепогодне спостереження, стереозйомка, інтерферометрична зйомка	

оптимальним орбітальним угрупованням;
— використовувати вже існуючі міжнародні мережі розподілу й обміну інформацією (наприклад, мережа ImageNet системи EROS);
— ще до запуску власного КА використовувати на пільгових умовах дані від партнерських КА спостереження Землі.

Виходячи з накопиченого науково-технічного потенціалу і запитів національних користувачів, доцільно розглянути можливість реалізації наступних проектів космічних апаратів (табл. 3).

При створенні перспективних КА особлива увага повинна бути приділена підвищенню інформаційних можливостей системи. У цьому плані в Україні є ряд оригінальних розробок, у тому числі:

- технологія програмно-координатного керування з можливістю керування режимами зйомки в реальному масштабі часу безпосередньо користувачем (технологія SEE);
- відеоспектрометр на акусто-оптичному фільтрі з можливістю адаптивного програмного вибору спектральних каналів в залежності від розв'язуваної цільової задачі (спільна розробка України і Росії, макет такого приладу випробувався на супутнику «Океан-О»);
- багаточастотний радіолокатор із синтезованою апертурою (випробувано авіаційний макет).

Для ефективної експлуатації космічного сегмента в інтересах користувачів визначальною умовою є створення наземної інфраструктури, що забезпечує регулярний прийом інформації від національних і закордонних КА, її обробку і доведення до користувача у виді готового товарного продукту.

Успішне рішення цієї задачі можливо тільки об'єднаними зусиллями космічної галузі і зацікавлених споживачів в особі відомств, центральних і місцевих органів державного керування.

1. Ракетно-космическая техника.—2000.—№ 25.—С. 5.
2. Space News.—2000.—**11**, N 13.—P. 6.
3. Imaging Notes.—November/December 1999.—**14**, N 6.
4. Пат. Украины 17366 А. Способ наблюдения Земли из космоса / Бушуев Е. И., Драновский В. И., Салтыков Ю. Д. и др. — Заявка 95030965 с приоритетом от 01.03.95 г.
5. http: backslash backslash www.orbimage.com
6. Презентация программы Eros. Erospresentation 1/99 — 25/01/99
7. Ракетно-космическая техника.—1999.—№ 3.—С. 3.
8. Space News.—1998.—**9**. N 42.—P. 6.
9. Положение о малых станциях приема в системе «Ресурс-О1». — Российское космическое агентство, 1999.
10. Гершензон В. Е. Доклад на 3-м украинском совещании пользователей данных ДЗЗ, ноябрь 2000 г., Киев.
11. Lawrence W. Fritz, High Resolution Commercial Remote Sensing Satellites and Spatial Information Systems. Lockheed Martin Corporation.
12. Stoney W. Pecora Legace — Land Observation Satellites in the Next Century // Pecora 13 Symp., South Dakota, August 22, 1996.—P. 19.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

МСУ-Е — багатозональний оптико-електронний скануючий пристрій високої роздільної здатності.
МСУ-ЕУ — багатозональний оптико-електронний скануючий пристрій високої роздільної здатності (модернізований).
МСУ-СК — багатозональний оптико-електронний скануючий пристрій середньої роздільної здатності.
МСУ-М — багатозональний скануючий пристрій малої роздільної здатності.
РЛС БО — радіолокаційна станція бокового огляду.
МТВЗА-ОК — багатоканальний оптико-мікрохвильовий сканер малої роздільної здатності з конічним законом сканування.
РФА — радіофізична апаратура.
НВЧ — надвисокочастотний (мікрохвильовий) діапазон.
ВИД — видимий діапазон.
ІЧ — інфрачервоний діапазон.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 52—56

Экология и космос

В. И. Волошин[1], В. И. Драновский[2], Е. И. Бушуев[1]

[1]Государственное предприятие «Днепрокосмос», Днепропетровск

[2]Государственное конструкторское бюро «Южное», Днепропетровск

На современном этапе развития биосферы особо важным становятся проблемы взаимодействия человека с окружающей средой. Природные процессы все теснее переплетаются с антропогенными. Дальнейшее планирование всестороннего развития общества требует учета экологических условий и оценки природных ресурсов.

Влияние социальной системы на биосферу все чаще приводит к нарушению экологических условий, ухудшению качества окружающей среды. С созданием академиком В. И. Вернадским учения о биосфере стало ясно, что в естественнонаучных работах необходимо выйти на новый уровень обзора окружающей среды — планетарно-космический, на котором стало бы возможным рассмотрение биосферы как единой глобальной открытой системы.

Новые требования к наукам о Земле потребовали расширения методических и технических средств исследований, позволяющих увеличить обзорность, большее внимание уделять получению региональной и глобальной информации о происходящих на Земле процессах. Для решения этих задач исследовательские приборы необходимо вывести далеко за пределы планеты. Такие возможности появились с рождением космической техники. Впервые с применением космических средств стало возможным изучение Земли как целостного космического тела. Украина как космическая держава свой уверенный путь во Вселенную начала с космических спутников для наблюдения Земли.

За годы независимости выведены на орбиту два космические аппарата наблюдения поверхности Земли «Січ-1» (1995 г.) и «Океан-О» (1999 г.). Готовится к запуску в 2003 г. спутник «Січ-1М».

Возможность всеобъемлющего наблюдения за поверхностью Земного шара в разных диапазонах электромагнитного спектра обеспечивает дистанционному зондированию из космоса уровень ведущей информационной технологии нового века. Это важно как для научных исследований, так и для решения чисто практических задач природопользования, экологической безопасности, предотвращения и ликвидации последствий природных и техногенных катастроф.

Находящийся на орбите космический аппарат «Океан-О» как раз и предназначен для комплексных исследований поверхности Земли и Мирового океана. По количеству аппаратуры общим весом 1.5 т и совокупности информационных каналов (а их около 30), охватывающих оптический, инфракрасный и микроволновый диапазоны спектра, этот аппарат не имеет аналогов в мировой практике и по праву может быть определен как космическая лаборатория исследования Земли [5].

Природоохранные исследования выступают как одно из главных направлений деятельности по сбору и обработке информации о Земле. Для получения и обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса усилиями научных коллективов ЦАКИЗ ИГН НАН Украины, ЦРЗЗ НАН и НКА Украины, МГИ НАН Украины, ГКБ «Южное» и ГП «Днепрокосмос» создана развитая научно-техническая и методическая база.

При помощи снимков, выполненных с «Океан-О» стало возможным оценить состояние лесов на территории Украины, состояние Днепра и его притоков, оценить экологическую ситуацию вокруг атомных электростанций, в том числе вокруг Чернобыльской АЭС.

Среди задач, решаемых методами ДЗЗ, проблемы экологии занимают особое место. Снимки, получаемые из космоса, позволяют охватывать на поверхности Земли большие территории, что дает возможность, применяя специальные технологии компьютерной обработки, анализировать изучаемые процессы в один и тот же момент времени на больших площадях.

Для изучения явлений, связанных с экологическим воздействием техногенных факторов на живую природу, космическая съемка производится обычно в нескольких спектрах, чаще всего в зеленом, красном и ближнем инфракрасном. Способность зеленой растительности отражать падающий на нее солнечный свет в каждом из этих спектров по разному определяется состоянием ее фотосинте-

© В. И. ВОЛОШИН, В. И. ДРАНОВСКИЙ, Е. И. БУШУЕВ, 2002

Рис. 1. Классификация растительности г. Днепропетровска по значению вегетационного индекса

Рис. 2. Загрязнение р. Днепр взвешенными веществами в пределах г. Днепропетровска

Рис. 3. Загрязнение взвешенными веществами Азовского и Черного морей по данным КА «Океан-О»

Рис. 4. Загрязнение воды р. Самары фитопланктоном

Рис. 5. Содержание фитопланктона в водах Черного и Азовского морей

Значения *VI* для растительности в разных районах города, которые приняты как тестовые участки

Объект исследования	Уровень техногенной нагрузки	Пределы значений вегетационного индекса
Парк им. Тараса Шевченко	Чистая зона	0.382—0.405
Парк им. Л. Глобы	Зона техногенной нагрузки	0.223—0.325
Парк им. Ленина	Зона техногенной нагрузки	0.220—0.260
Туннельная балка	Зона промежуточной техногенной нагрузки	0.335—0.398
Орельский лес	Чистая зона	0.357—0.417

зируемого аппарата, структурой клеток, насыщенностью растения влагой и влиянием других факторов. Зная эти закономерности, возможно оценить состояние наземной растительности, прогнозировать урожайность сельскохозяйственных культур, а также некоторые другие процессы [1—4].

На рис. 1 представлен космоснимок г. Днепропетровска и пригородной зоны, на котором выделены участки с различным состоянием земной растительности.

В качестве примера рассмотрено влияние техногенной нагрузки и других неблагоприятных факторов на состояние растений. Для этого использовался вегетационный индекс (VI), который рассчитывался на основании сопоставления яркости отраженного растениями солнечного излучения в зеленом, красном и ближнем инфракрасном спектрах. Уменьшение VI свидетельствует о неблагоприятных условиях существования для растений, увеличение — наоборот.

В таблице представлены результаты расчета VI для растительности в разных районах города, которые приняты как тестовые участки. Как видим, наиболее благоприятными для растений являются районы Орельского леса и парка им. Тараса Шевченко. Остальные лесопарковые зоны испытывают разной степени техногенные и, возможно, неблагоприятные климатические нагрузки.

На рис. 1 разными цветами выделены участки растительности, имеющей, согласно показателю вегетационного индекса, большую, среднюю или низкую техногенную нагрузку. Ярким цветом выделены участки с отличными условиями для растительности (VI находится в пределах 0.460—0.400), темным — участки со средним уровнем техногенной нагрузки (VI в пределах 0.390—0.230), и наконец, участки с техногенной нагрузкой (VI в пределах от 0.229 до 0.050). Участки с высоким уровнем техногенной нагрузки (VI ниже 0.050) на этом космоснимке не выделяли.

При этом необходимо отметить, что условия, благоприятствующие процессу фотосинтеза и росту растений, не всегда совпадают с санитарно-гигиеническими требованиями, рекомендуемыми для человека. Так, например, для растений является благоприятным повышение в воздухе количества углекислого газа, а иногда даже серы. Особенно для растений, произрастающих на почвах с низким содержанием серы, которая является необходимым компонентом для биосинтеза белка в растительных и животных организмах.

Спектральные характеристики воды, как и спектральные характеристики растительности и почв, изменяются в зависимости от длины волны, падающей на объект и взаимодействующей с ним. В естественных условиях поверхность чистой воды поглощает почти всю падающую на нее энергию в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах, и отражает только в видимом диапазоне. Но величина отражательной способности в видимом диапазоне зависит от чистоты исследуемой воды. Взвешенные вещества, микроводоросли (фитопланктон) существенно изменяют отражательные свойства воды и позволяют использовать дистанционные методы зондирования для оценки чистоты воды [1, 4].

Контроль за концентрацией и пространственным распределением загрязнений в водной среде важен для систем водоохраны, водопользования и эксплуатации водохранилищ. Информация о переносе взвесей, кроме экологического и санитарно-биологического значения, представляет также интерес для изучения процессов эрозии берегов, переформирования мелей и зон аккумулирования взвесей. Но, конечно, наибольшее значение дистанционные методы исследования, в частности космическая съемка, имеют для оценки степени загрязненности рек и водоемов, определения источников загрязнения [3].

Уровень загрязнения взвесями с помощью космосъемки оценивается преимущественно при использовании данных, получаемых в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. На рис. 2 представлен снимок р. Днепр в пределах г. Днепропетровска, на котором разным цветом показана концентрация взвесей в поверхностном слое воды. Как видим, концентрация таких взвесей существенно увеличивается в зоне городской черты за счет попадания в воду промышленных и неорганизованных бытовых стоков.

Рассмотренный подход был использован для классификации космоснимков Азовского и Черного морей по взвешенным частицам (рис. 3). Хорошо выражена сравнительно чистая вода Черного моря, кроме устьев рек Южный Буг и Днепр, в сравнении с водами Азовского моря. На снимке прибрежные районы Азовского моря, особенно в урбанизирован-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 56—57

ной зоне, выделяются как сильно загрязненные взвесями.

Большой интерес для хозяйственной деятельности человека представляет возможность выявления участков водной поверхности, содержащих фитопланктон. В морях и океанах такие участки являются наиболее вероятными на наличие зоопланктона и рыбы, для которых микроводоросли являются основной пищей. Для рек и озер это, при больших концентрациях, показатель степени загрязненности водных объектов.

Результаты обработки космоснимков на наличие фитопланктона представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4 представлен фрагмент космоснимка с изображением оз. Ленина, являющегося разливом р. Самары при впадении ее в р. Днепр. А на рис. 5 — участки Черного и Азовского морей. Довольно высокая концентрация микроводорослей в Азовском море во многом объясняет, почему именно оно является богатой рыбой по сравнению с Черным морем.

С помощью космического зондирования можно оценивать состояние сельскохозяйственных культур и прогнозировать их урожайность, оценивать состояние лесных массивов. Решаются задачи, связанные с мониторингом и прогнозом наводнений и подтоплений, задачи кризисного мониторинга.

В этой статье показана лишь малая доля того, что можно исследовать с помощью космической съемки. Но даже изложенное показывает большие возможности, которые открывают методы космического зондирования в экологии и хозяйственной деятельности человека.

Активная деятельность космического аппарата «Океан-О» имела большое практическое значение не только в области дистанционного зондирования, но и для специалистов ГКБ «Южное», которые уже работают над проектами космических аппаратов для более детального исследования поверхности Земли.

В Национальной космической программе Украины 2003—2007 гг. предусмотрено последовательное создание космических систем «Січ-1М», «Січ-2», «Січ-3», а также микроспутников «МС-1ТК», «МС-2-8», состав исследовательской аппаратуры которых будет отвечать современному мировому уровню развития средств ДЗЗ и позволит эффективно решать целый ряд практических задач по изучению Земли как среды обитания человека.

1. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988.—343 с.
2. Обиралов А. И. Дешифрирование снимков для целей сельского хозяйства. — М.: Недра, 1982.—144 с.
3. Мищенко Н. В., Кузьмин О. В., Трифонова Т. А. Дистанционное зондирование в целях экологического мониторинга // Сб. докл. Всероссийской науч. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами», Муром, 20—22 июня 2001 г.
4. Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Ф. Свейна, Ш. Дейвис. — М.: Недра, 1983.—396 с.
5. Космічний аппарат для спостереження Землі «Океан-О». — НКАУ, ДКБ «Південне», 2000.

Питання аерокосмічного моніторингу і його особливості в Західному регіоні України

А. А. Комісарчук

Науково-дослідний центр аерокосмічної інформації та екологічного моніторингу при ІК ім. В. М. Глушкова НАНУ-НКАУ, Львів

Відсутність системи моніторингу навколишнього природного середовища з використанням аерокосмічної інформації і відсутність правової бази використання аерокосмічної інформації не дає змоги повно і об'єктивно оцінювати екологічну ситуацію, володіти достовірною науково обгрунтованою інформацією про реальну загрозу і потенційні соціальні наслідки як очевидних порушень, так і прихованих негативних впливів на природне середовище.

Першочерговим завданням в екологічній політиці є проведення інституційних реформ державної системи охорони довкілля та використання природних ресурсів, впровадження механізмів та інструментів екологічної політики, реалізація пріоритетних національних і державних програм з метою створення умов для сталого збалансованого розвитку держави, створення державної системи регулювання екологічної безпеки як невід'ємної складової національної безпеки України.

В цьому плані нереалізовані завдання І Національної космічної програми України зі створення п'яти регіональних центрів прийому, обробки і

© А. А. КОМІССАРЧУК, 2002

впровадження аерокосмічної інформації в народне господарство як складової державної системи моніторингу навколишнього природного середовища.

У сфері екологічної, техногенної безпеки і цивільного захисту населення необхідно спрямувати зусилля на створення надійних гарантій безпечної життєдіяльності людей, досягнення високих норм та стандартів захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, на розв'язання проблем, спричинених надвисоким техногенним навантаженням, на запобігання виникнення надзвичайних ситуацій шляхом реалізації державних, регіональних, місцевих та об'єктових програм зниження рівня техногенно-екологічних ризиків. Важливу роль в розв'язанні цих завдань може відіграти аерокосмічна інформація з її оперативністю і достовірністю як в окремих точках, так і на великих територіях, а саме: оперативний аерокосмічний моніторинг надзвичайних ситуацій і організація дистанційного обстеження територій з передкризовими і кризовими ситуаціями, які мають виразні прояви (ознаки) катастрофічних явищ та їх передвісників.

Екологічні проблеми Західного регіону споріднені із загальнодержавними проблемами України, але й мають свою чітко виражену відмінність. З одного боку, регіон характеризується наявністю гірничодобувної, нафтопереробної, хімічної, целюлозно-паперової промисловості, а також машинобудівної галузі з їх недосконалими енерго- та ресурсозатратними технологіями і значною кількістю виробництв-забруднювачів навколишнього природного середовища. З іншого боку — це Українські Карпати (4 % території держави) — скарбниця рекреаційних можливостей, «легені Європи», які нині перебувають під впливом забруднень від промислових підприємств і транскордонного переносу.

Надзвичайно гострою для Західного регіону України є проблема техногенно-екологічної безпеки. В регіоні почастішали природні та природно-техногенні катастрофи (паводки, повені, зсуви та ін.), наслідки яких стали загальнодержавною проблемою.

Основними територіями регіону, процеси в межах яких мають кризовий характер, є:

- Львівсько-Волинський вугільний басейн;
- Яворівський, Роздільський та Подорожнянський кар'єри сірчаних родовищ;
- Стебнік, Дрогобицька гірничо-промислова зона:
- нафто-, продуктопроводи і території, які до них примикають;
- ділянки безконтрольного відбору піщано-гравійної суміші в межах басейну рік регіону;
- ділянки природного та техногенного розвитку карсту;
- зсувів, селей, підтоплення, ерозії та інших природних та техногенно-природних процесів особливо в гірських районах Карпат Львівської, Івано-Франківської, Чернівецької та Закарпатської областей.

Регіону сьогодні не вистачає комплексності в підході до питань еколого-економічної безпеки. Необхідним є створення в регіоні системи постійного повномасштабного аерокосмічного моніторингу стану довкілля з його оперативністю і достовірністю на рівні всіх адміністративних одиниць з метою отримання інформативних ресурсів для прийняття адекватних управлінських рішень.

Кінцева мета, якої планується досягти — постійний контроль за екологічним станом, прогнозування, відслідковування тенденцій розвитку природних та техногенних негативних явищ і оцінки їхніх наслідків в Карпатському регіоні, Поліській і Подільській зонах заходу України, забезпечення зацікавлених міністерств, облдержадміністрацій об'єктивною аерокосмічною інформацією для прийняття управлінських рішень, використання в повну силу людського, організаційного і наукового потенціалу регіону.

Практичне значення — забезпечення аерокосмічною інформацією організаційних (підвищення техногенної безпеки і ефективності реагування на надзвичайні ситуації), агротехнічних, лісогосподарських, меліоративних заходів, раціонального використання ресурсів та попередження втрат врожаю, відновлення родючості грунту, продуктивності і стійкості лісів, рекультивації території, які піддавались значному техногенному впливу, тощо.

Створення державної системи моніторингу, основою якої мають бути державні регіональні центри і їх повномасштабне фінансове забезпечення є невідкладним завданням сьогодняшнього часу.

Україна — не полігон для надзвичайних ситуацій.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 58

Особливості співпраці державних та недержавних установ в напрямку дистанційного зондування Землі в Україні

О. О. Мазуркевич, О. Д. Рябоконенко

Український Центр менеджменту землі та ресурсів, Київ

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) з космічних апаратів є одним з пріоритетних напрямків сучасної космічної науки і технології, який дозволяє досліджувати не лише фундаментальні глобальні процеси і явища, але й оперативно та економічно вирішувати природоресурсні і природоохоронні задачі. Сучасні космознімки земної поверхні в різних електромагнітних діапазонах містять величезні обсяги інформації і дозволяють розрізняти предмети розмірами до перших метрів. В Україні як в суверенній державі дослідження в цій галузі виконуються за Державною космічною програмою, яка була започаткована в 1992 році. Українські вчені в галузі ДЗЗ вносять вагомий вклад у виконання космічної програми. Особлива увага приділяється створенню теоретичних основ, методик і комп'ютерних технологій та унікальної апаратури для дистанційного дослідження земної поверхні, морів і океанів з космосу в різних спектральних діапазонах для пошуків корисних копалин, екологічного контролю довкілля, метеорологічного прогнозування та визначення стану сільськогосподарських угідь.

Протягом останніх десятиріч склалися міжнародно визнані наукові школи в галузі дистанційного зондування Землі. Одним з визнаних лідерів є Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, який проводить дослідження з розробки моделей енергомасообміну в геосистемах, формування їх спектральних сигналів та створення на їх основі методів і технологій комп'ютерного дешифрування мультиспектральних космічних знімків для вирішення екологічних та нафтогазопошукових задач. Ці дослідження дістали міжнародне визнання і відзначені рядом нагород та грантів.

В останні роки космічна галузь набула бурхливого розвитку. Суттєво збільшився об'єм та якість матеріалів дистанційного зондування Землі, зменшилась їхня вартість. Сьогодні на ринку даних ДЗЗ, поряд з поліпшенням характеристик і зменшенням ціни на дані «традиційних» систем (максимум десяток каналів у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру), усе ширше пропонуються нові типи даних, такі як гіперспектральні або радарні. Так, супутник «Earth Observing-1» має борту гіперспектральний 220-канальний сенсор з 30-метровою роздільною здатністю. Сучасний рівень розвитку засобів ДЗЗ дає можливість одержати високоточні дані про параметри суходолу та водної поверхні з необхідною просторовою роздільною здатністю і періодичністю поновлення інформації. Такі дані необхідні для вирішення великої кількості екологічних та природоресурсних задач як фундаментального, так і прикладного характеру в областях екології, природокористування, сільського господарства, метеорології, океанології, географії та геофізики. Все це знайшло своє відображення на ринку послуг ДЗЗ. Почали з'являтись недержавні підприємства, що пропонують високотехнологічні послуги з використанням методів ДЗЗ та ГІС-технологій. Одним з таких прикладів є Український Центр менеджменту Землі та ресурсів (УЦМЗР), заснований Українським інститутом досліджень навколишнього середовища і ресурсів Ради національної безпеки і оборони України та Мічиганським інститутом досліджень навколишнього середовища. Завданням УЦМЗР є застосування даних дистанційного зондування Землі, цифрової картографії, географічних інформаційних систем та інших інформаційних технологій з метою підтримки процесу прийняття рішень на державному рівні та в приватному секторі. Діяльність УЦМЗР сприяє вирішенню завдань у таких напрямах як агробізнес, екологічний менеджмент, збереження природних ресурсів, реагування на надзвичайні ситуації, капіталовкладення, розвиток інфраструктури, приватизація, землекористування та землеустрій.

На сучасному етапі розвитку ДЗЗ в Україні важливим є поєднання зусиль нових створених недержавних підприємств та відомчих наукових установ, які могли б здійснювати співробітництво на основі впровадження методології та методики сучасних інформаційних технологій.

© О. О. МАЗУРКЕВИЧ, О. Д. РЯБОКОНЕНКО, 2002

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 59—65

Принципово нові можливості для формування екомережі в Україні у зв'язку з появою досвіду цільової обробки та інкорпорації космознімків в ГІС

В. І. Придатко, Ю. М. Штепа

Український центр менеджменту землі і ресурсів, Київ

ВСТУП

Із розвитком інформаційних технологій в Україні з'являються принципово нові можливості для формування екомережі і вирішення багатьох інших супутніх питань: містобудування, уніфікація транспортної мережі, рекреаційне упорядкування територій тощо. На наш погляд, складається ситуація, коли кількісне накопичення інформації має призвести до першого якісного стрибка.

За станом на весну 2002 р. даних з використання результатів дистанційного зондування та результатів ГІС-аналізу (саме для цілей проектування екомережі в України) було настільки мало, що навіть у двох найбільш помітних останніх цільових збірках щодо екомережі, ініційованих Мінекоресурсів України, не було показано жодної ілюстрації, взятої із ГІС [1, 4]. До цього часу багато хто з управлінців демонструє схему екомережі України як чорно-білу схему масштабу біля 1:4 000 000, вважаючи її завершеною. Як результат, на основі такого ж схематичного підходу працює тепер сама стратегія розбудови екомережі. Колись, на старті, вона зіграла свою поштовхову роль, а далі, якщо ситуація не зміниться, буде працювати не стільки на екомережу, скільки проти неї. Адже за допомогою схем дуже важко буде розмовляти із землевласниками нового покоління, прибічниками і противниками екологічного підходу в землекористуванні. Певна сумна традиція склалась і з часів видання першої Червоної книги України, у 1994—1996 рр. — це демонструвати місця розповсюдження червонокнижних тварин на настільки загальних маленьких картинках, що залишалось тільки радіти, що тварини і рослини цих схем не використовують. Не секрет, що вони бачать поверхню землі зовсім іншими очима, про що кожний дослідник переконується, працюючи в експедиціях. (Тварини не користуються ані рисунками, ані військово-топографічними картами).

Не краща ситуація і у середовищі ГІС-спеціалістів і ГІС-аматорів щодо освоєння цього нового напряму, про який йдеться. Якщо взяти за показник їхньої активності хоча би публікації останніх конференцій національного рівня з питань ГІС — це «Ялта-2001» і «Київ-2002», то і там ми майже не знайдемо відповідних робіт. За останні півроку відповідні публікації виходили в світ, мабуть, що тільки за ініціативи спеціалістів УЦМЗР [3, 2]. З іншого боку, перспективи використання ГІС для цілей моніторингу біоресурсів неодноразово демонструвались в Україні — це хоча б по відношенню до Чорнобильської зони відчуження. Тоді це дозволило показати, зокрема, як міг би виглядати у просторі і часі перехід радіонуклідів із рослин у грунти. Укладались й продовжують укладатись ситуаційні карти «мільйонки» із шарами щодо рослинності, лісів, захворювання лісів, різновидів груп порід або порід дерев, іноді — ветландів, розповсюдження рідких видів рослин чи тварин і т. д. На цьому фоні тоді піонерними виглядали спроби працювати з ArcInfo чи MapInfo, де за основу брались електронні версії карт України масштабу 1:500 000.

Саме так, за міжнародної фінансової підтримки в Україні було розроблено стартові ГІС для біосферного заповідника Дунайські плавні та для Карпатського біосферного заповідника. (Саме стартові, бо надалі, за нашою інформацією, професійне наповнення ГІС там зупинилось, зокрема через відсутність ГІС-спеціалістів). З іншого боку, поступово набутий досвід тепер логічно призвів до стрибка. У багатьох заповідниках та неурядових природоохоронних організаціях керівництво вже відчуло, наскільки перспективним є уточнення карт територій та об'єктів природно-заповідного фонду та елементів майбутньої екомережі за допомогою дис-

© В. І. ПРИДАТКО, Ю. М. ШТЕПА, 2002

танційного зондування та ГІС-аналізу. І якщо перепони швидкому розгортанню існують, то, мабуть, тільки цінові та комунікаційні. (Досить часто на наукових нарадах можна почути репліки, що скоріш за все цей напрям у заповідній справі є коштовним, а звідси невиправданим — легше, мовляв, пальне для патрульних автомобілів купити, або будівельні матеріали). І людей можна зрозуміти — просто не всі мають можливості встановити ліцензійний ГІС-продукт у заповіднику, або отримати космознімок, і побачити, що він накриває величезну площу з інформаційної точки зору є як торт із начинкою-сюрпризом, в якому дуже багато стислої інформації. (Наприклад, космознімок «Landsat» накриває площу близько 34 тис. км^2).

Так чи інакше процес іде, і згідно з законом України «Про Загальнодержавну програму формування національної екомережі України на 2000—2015 роки» (Постанова Верховної Ради України № 1989-III, від 21.09.2000) в Україні має бути розгорнута широка робота щодо картографування природних комплексів, створення геоінформаційних систем, інвентаризації місцезростань видів рослин, занесених до Червоної книги України. Так само — рослинних угрупувань, занесених до Зеленої книги України. Нижче нами показано, як у цій справі екомережебудівництва могло б застосовуватись дистанційне зондування та ГІС.

Перші результати подібної роботи, виконаної на комерційній основі, нами було показано іще на 4-й міжнародній ГІС-конференції у Ялті [3]. На той час УЦМЗР та його партнером ERIM було використано знімки «Landsat» за 1977, 1999 та 2000 рр. Це дало можливість значно поновити інформацію про просторову прив'язку цілого ряду природних об'єктів й інтегрувати в ArcInfo 8.0 дані з багатьох архівних джерел. Для України цей досвід був чи не одним із перших. Сьогодні перелік як використаних знімків «Landsat», так і карт, актуалізованих для цілей природно-заповідної діяльності, нами значно збільшено. Отриманий досвід дає можливість стверджувати, що в Україні з'явилась можливість для принципово нового підходу до роботи з екологічною мережею, більш ретельною вибудовою її елементів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Дана стаття написана на прикладі інформації, отриманої УЦМЗР разом із партнерами в результаті виконання декількох проектів, в яких активно використовувався ГІС-підхід. В даний час ми володіємо значною інформацією, яку завантажено в ArcInfo 8.0, доступною сьогодні у повному обсязі, поки що тільки в мережній ГІС УЦМЗР. Найцікавіші інтегровані результати роботі ми постійно розповсюджуємо у вигляді публікацій, матеріалів для тренінгів, та через Інтернет. Уніфікація даних здійснюється нами за рахунок впровадження проектів і співробітництва. Зокрема, в 2002 р. за рахунок проектів було придбано два нових космознімки «Landsat-7» на територію АР Крим. В результаті розроблено новий цифровий шар у ГІС щодо поверхні півострова в контексті вже існуючої цифрової карти 1:200 000. (Це без невеликої частини Керченського півострова, на якому сходиться разом чотири космознімки «Landsat» — досить рідкісний випадок.) На новій цифровій основі, разом із Таврійським національним університетом ім. В. Вернадського нами було актуалізовано карти основних заповідних територій чи об'єктів природно-заповідного фонду, площа яких перевищувала 100 га, і що було методично виправданим для масштабу 1:200 000. Продукт повністю адаптовано для використання в GIS (ArcInfo).

Усі процедури й алгоритми, що мали місце при аналізуванні космознімків і класифікації земної поверхні, були орієнтовані на застосування «ERDAS Imagine 8.4». Для роботи частково або повністю використовувалось чотири знімки «Landsat-7 ETM+» від 12 серпня 1999 р. і від 21 серпня 2000 р.

Знімки покривали південну частину України і майже весь Кримський півострів — це приблизно від 31°00′ до 36°30′ східної довготи і від 45°00′ до 48°00′ північної широти. Слід зазначити, що на знімках 1999 р. окремі території були закриті хмарами, зокрема в районі Миколаєва, Мелітополя й у північно-східній рівнинній і південній гірській частині Криму. Невеликі згустки хмар закривали Керченський півострів, а також території над півостровом Ягорлицький Кут і над Кінбурнською косою. (Відомо, що наявність щільної хмарності вносить перекручування в результати дистанційного аналізу, або навіть взагалі виключає можливість проводити обробку таких ділянок).

Наведена нижче нумерація отриманих нами класів земної поверхні є умовною. У дужках ми даємо назву класів на англійські мові, щоб показати, що аналогічні класи схильні виділяти і зарубіжні експерти, зокрема, в США, де розповсюджені аналогічні програмні засоби, а також щоб читалась легенда для рис. 2, який ми наводимо в англомовній інтерпретації.

На жаль, у чорно-білому зображенні рис. 2 непрезентабельний. Тим краще навіть, що читач тепер знатиме, що в силу обставин він залишається відрізаним від цілого прошарку знань, спільно накопичених багатьма ентузіастами справи дистанційного зондування і ГІС. Колись ця ситуація, безумовно, поміняється на краще. Нам навіть здається, що ця відрізаність продовжує бути причиною

Рис. 1. Мозаїка території Криму на базі знімків «Landsat-7»

Рис. 2. Класифікація земної поверхні в ГІС УЦМЗР з контурами заповідних територій АР Крим

певного скепсису серед екологів щодо практичного значення напряму. Кольоровий оригінал можна отримати в УЦМЗР — http://www.ulrmc.org.ua, Prydatko@ulrmc.org.ua.

1. Води (Water) — моря, озера, ріки з чистою, глибокою водою.

2. Мілководдя (Shallow-water) — мілководдя на морях, ріках і озерах із майже повною відсутністю рослинності, і, вода із великою кількістю зважених часток (Південний Сиваш). Це також мілка вода у затоці Сиваш, мілини у Тендрівській затоці та тих акваторіях, що розташовані біля північно-західної частини о. Джарилгач.

3. Вода, що квітне (Blooming water) — вода піддана цвітінню (наприклад, у Каховському водоймищі, в багатьох замкнутих водоймах), і мілка вода із наявністю водної рослинності (наприклад, у південній частині лиману Молочний), східній та західній частинах узбережжя затоки Сиваш, у північно-західній частині о. Джарилгач.

4. Розсіл (Brine) — місця, де висококонцентрований розчин солі займає значну територію (наприклад, Східний Сиваш), і, як правило, в районах промислового видобутку солі.

5. Мокра сіль (Wet-salt) — мокра сіль, що зустрічається на мілководдях озера Сиваш, а також у деяких інших місцях, і як прикордонний шар між розчином солі і сухою сіллю (озеро Кефальне на сході Чорноморського державного заповідника, території у північній частині Утлюцького лиману).

6. Суха сіль (Dry-salt) — суха сіль зустрічається практично всюди на узбережжі затоки Сиваш (особливо в центральній і західній частинах), а так само практично у всіх місцях, пов'язаних із солоними озерами регіону. Відзначимо, що надзвичайно велике покриття сухою сіллю, помітне на космознімках у нашому випадку, було обумовлене сухим літом 2000 р. та підсиханням солоних озер.

7. Пісок (Sand) — «чистий» пісок без рослинності, піщані коси, пересипи й акумулятивні утворення. Наприклад, арена Альошківських пісків, що в районі міста Нова Каховка і далі, має унікальні для України розміри. У деяких місцях до даного класу віднесені кар'єри і злітно-посадочні смуги, що мають аналогічні з піском характеристики відбиття світла.

8. Хвойні ліси (Coniferous forest) — хвойні ліси, в основному штучні насадження, наприклад для зони Альошківських пісків. Насадження хвойного лісу зустрічаються так само і на півострові Казантип.

9. Листяні ліси (Deciduous forest) — листяні ліси, в основному зосереджені на території Альошківських пісків і в заплаві річки Дніпро. Однак на відміну від хвойних лісів вони суттєво розріджені і тому складаються з безлічі невеликих ділянок. Листяні ліси розрізняються на космознімках також біля Молочного лиману, на півострові Казантип і на східному краї Тендрівської коси.

10. Чагарники й рідколісся (Bushes and sparse growth of trees) — Чагарники й рідколісся для внутрішньої території Альошківських пісків, які звичайно займають прикордонну територію між лісом і степом. Вони так само займають вирубки або місця вигорілих лісів. Зарості чагарнику зустрічаються в заплаві Дніпра, на косах і островах Чорного й Азовського морів.

11. Очеретяно-болотна рослинність (Reed-marsh vegetation) — черетяно-болотна рослинність займає велику територію в гирлі Дніпра та в морських затоках і лиманах, на островах і косах. Слід відзначити і наявність територій, закритих очеретяними заростями — це на західному узбережжі й у східній частині затоки Сиваш.

12. Степи (Steppe) — у цьому класі нами об'єднано низку різних типів степових територій, основними з яких є степ біосферного заповідника «Асканія Нова», степ півострова Ягорлицький Кут, степ Національного природного парку «Азово-Сиваський».

13. Піщані степи (Sand steppe) — піщані степи поширені, в основному, на території Альошківських пісків у Херсонській області.

14. Кам'янисті степи (Stone steppe) — кам'янисті степи, які розташовані на Тарканхутському півострові, що в західній частині Криму, і степи північної частини Керченського півострова і мису Казантип.

15. Степи із ознаками спустювання і солонці (Desert steppe and salinas) - спустелені степи й солонці віднесені нами до одного класу, оскільки мають близькі спектральні характеристики і часто близькі територіально, що не дозволяє розділити їх навіть із допомогою методу маскування. Степи цього «класу» поширені у західному Криму, на Альошківських пісках, на територіях, що межують із затокою Сиваш, у південній частині півострова Ягорлицький Кут.

16. Території, що горіли (Fire scars) — постраждалі від пожеж ділянки сільськогосподарських угідь, степів і лісів. Сухе й жарке літо 2000 р. (і штучні підпали) були причиною безлічі пожеж, сліди від яких зафіксовано і логічно відображено в даному класі земної поверхні. Відзначимо, що до цього класу нами віднесено і ті ділянки, на яких пожежа відбулася не так давно, і де земля не встигла покритися рослинністю. Це також могли бути поля, ще не переорані після пожежі. Наявність деяких пожеж у районі затоки Сиваш, біосферного заповідника «Асканія-Нова» та ін. була підтверджена для нас очевидцями. Цікаво, що на знімку «Landsat» від 21 серпня 2000 р. дуже чітко,

по диму, розпізнаються дві пожежі. Перша — біля селища Зміївка, що в районі Каховського водосховища, друга — біля селища Глинка в АР Крим.

17. Відкриті розробки корисних копалин (Opencast mine) — відкриті розробки корисних копалин — у нашому випадку це шахти, кар'єри, каменоломні. Оскільки спектральні характеристики цих об'єктів близькі до класів «суха сіль» або «пісок», виділення територій даного класу проводилося нами за допомогою маскування класів «суха сіль» і «пісок». Для визначення місця розташування відкритих розробок використовувалась картографічна й довідкова інформація. Значна кількість об'єктів даного класу розташована в західному Криму — наприклад, каменоломні.

18. Промислові території (Industrial regions) — великі промислові підприємства й землі, що відчувають вплив промислової діяльності (Херсон, Нова Каховка, Мелітополь, Джанкой). До того ж класу нами віднесено і території, що межують із рядом штучних водойм титанового заводу, розташованого на Кримському перешийку.

19. Урбанізовані території (Urban areas) — урбанізовані території, тобто території з високою щільністю населення. Вони характеризуються також високою щільністю розміщення будівель, інженерних споруд і заасфальтованих доріг. Природно, що ідентифікація цього класу проводилася нами тільки на територіях населених пунктів.

20. Сільські території (Rural areas) — це сільські території, які характеризуються малою щільністю населення, будівель, доріг і високою щільністю присадибних ділянок, садів, городів. Ідентифікація цього класу проводилася тільки на територіях населених пунктів і пов'язаних із ними землях.

21. Відкрита земля (Bare ground) — поорана земля, земля без рослинності.

22. Поля із зерновими (Grain production) — поля, на яких вирощуються зернові культури. У цей клас увійшли скошені сільськогосподарські поля, на яких залишилась не прибрана солома. Відзначимо, у період, коли був зроблений знімок (це серпень), проводиться збирання врожаю, тому частково поля, на яких вирощувалися зернові культури, були розорані, а частково спалені (що практикується у деяких господарствах). Одна із двох зафіксованих на знімках пожеж мала місце саме на зерновому полі.

23. Рисові поля (Rice production) — рисові поля, рисові чеки. Дані об'єкти відрізняються великою різноманітністю спектральних характеристик, що, в свою чергу, пов'язано з особливостями різних технологій вирощування рису. Однак через унікальну форму полів добре ідентифікуються на космічному знімку. Для виділення даного класу використовувалася існуючі карти, де вказано розташування рисових полів, а інші території маскувалися. Такі поля розташовані переважно уздовж берега Чорного моря від Тендрівської затоки в Херсонській області до Лебединих островів у Криму. Друга велика ділянка рисових полів розташована у Нижньогорському районі Криму, на узбережжі затоки Сиваш.

24. Фруктові сади (Orchards) — фруктові сади, так само як і рисові поля, мають великий розкид спектральних характеристик, що зв'язано з розмаїттям, щільністю, й технологією обробки та віком фруктових дерев. По текстурі сади практично не відрізняються, наприклад, від виноградників. Тому відсутність сучасної карти фруктових садів не дозволяє точно виділити всі території, що відносяться до даного класу. Для нашого прикладу були визначені тільки ті сади, які по текстурі й спектру можна віднести до садів. До того ж ці ділянки повинні були відповідати садам, вказаним на паперовій карті. Отже, нові сади в даному класі відсутні.

25. Поливні сільськогосподарські культури (Irrigable crops) — поливні сільськогосподарські культури типові для землеробства Південної України. Поливні землі розташовуються в основному поблизу іригаційних каналів, що транспортують воду Дніпра практично на всю розглянуту територію (за винятком західного Криму).

26. Інші сільськогосподарські землі (Others agricultural areas) — сільськогосподарські землі, які не були включені в інші класи. Це, наприклад, пасовища, поля, що не використовуються, зарості бур'янів, городи, деякі виноградники та ін.

27. Території, які не піддаються класифікації (Unclassified) — території, де наявність хмар не дозволила визначити класи. Ми враховували, що на територіях, закритих хмарами, похибка класифікації є дуже високою. Це зв'язано із серпанком, який зменшує прозорість атмосфери і вносить похибку в спектр відбитого від поверхні випромінювання.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сама по собі класифікація є тільки основою для розвитку напрямку «ГІС та екомережебудування». Ми залишаємо поза межами даної статті інший і дуже цікавий аспект справи — це обговорення того, із якими саме видами тварин чи рослин можна було б працювати в ГІС, в яку вже інкорпоровано результати оброки космічних знімків. На наш погляд, найближче до цієї справи підійшли наукові колективи заповідних територій, де, незважаючи на відомий фінансовий кризовий період, все ж продовжували польові дослідження й утримували

ряди даних щодо стану справ на модельних площадках.

Дякуючи інформаційному внеску Чорноморського біосферного заповідника, в ГІС УЦМЗР уже працюють дані щодо обліку тварин на цій території, а їхні модельні площадки прив'язані до електронної карти, точніше до точки на електронній карті. Ми наводимо цей приклад для того, щоб підкреслити, що у свою чергу ця точка є тільки точкою, але навіть не геометричним центром полігону, що як раз і можна зробити надалі по космічному знімку, інтегрованому в ГІС. На космознімку контури модельної площадки (буває, що це поле, ліс, велика піщана арена) пізнаються дослідником краще, ніж на паперовій карті. У свою чергу, засоби ГІС дають змогу легко підрахувати площу подібної складної фігури. Похибку методу іще потрібно вивчити у експерименті, але ясно одне: порядок чисельності значного списку тварин і на великій території можна буде визначити досить точно й порівняно швидко.

Практичне значення дослідження і в тому, що підхід можна використовувати для серйозного поновлення ситуаційних карт, які циркулюють в екологічний мережі, перегляду площ уже відомих територій, важливих для екомережі, робити оверлеп-аналіз, та використовувати матеріали для навчання.

Для цілей популяризації результатів досліджень протягом 2001 р. тверді копії мозаїки АР Крим (А4) нами було передано до Рескомприроди АР Крим, в Раду Міністрів АР Крим, в Таврійський національний університет ім. В. Вернадського, із яким щоденно працює Рескомприроди АР Крим. В Райраду Джанкойського району нами також передано мозаїку Джанкойського району (А4). Коротка інформація та ілюстрації щодо виконання наших проектів були у свій час розіслані електронною поштою також до Управління водних ресурсів Мінекоресурсів України, Управління екоресурсів Донецької обл., у Мелітопольський педагогічний університет, в біосферні заповідники Півдня України. Важливо відмітити, що найперші позитивні відгуки ми почули саме з місць, а не з міністерств чи відомств. Тобто, там і є нагальна потреба в даній інформації і живий інтерес до нового.

На наш погляд, і ще **до цього часу залишається суттєвою відстань між можливостями використання інформаційних продуктів, про які йдеться, і спроможністю багатьох державних і недержавних інституцій їхнього сприйняття**. Не виключено, що надання цим потенційним користувачам можливості доступу до такої ГІС-продукції, скоріше за все, доцільно робити через Інтернет, і що є сьогодні чи не єдиним виходом із даної ситуації, коли вони відчувають нестачу спеціалістів, програмних засобів і техніки. За нашими оцінками лише невелика кількість установ має ліцензійні ГІС-програми, і тому може працювати з інформацією записаною, наприклад, на CD.

Ця тема щодо доступу до результатів подібної роботи через Інтернет додає додаткової гостроти, адже принципова новизна запропонованого нами підходу іще й в тому, що Україна може швидше інтегруватись через нього до Всеєвропейської інформаційної мережі, щільно пов'язаної із Всеєвропейською екологічною мережею і із Всеєвропейською системою дистанційного моніторингу.

Вище нами показано, що застосування космічної інформації заставляє подивитись на стан справ щодо змін земної поверхні новими очима. Принаймні, дійсні масштаби острівізації природних екосистем, наприклад, у степах, просто вражають (рис. 2), і що проглядає навіть на необроблених космознімках (рис. 1). Але головне не тільки це, а й те, що зараз науковці мають змогу оцінити площі тих чи інших «полігонів» для цілей заповідної справи новим інструментальним способом безпосередньо в ГІС. Це може дати нові цифри не тільки відносно реальної площі найпростіших елементів екологічної мережі (на роботу із якими вже націлена відповідна частина державного бюджету), а й взагалі збагатити наше уявлення про те, як наші підходи до кількості елементарних одиниць екомережі співвідносяться з кількістю «елементарних одиниць», прийнятих за основу у більшості країн Європи. Можливо, це вдалося б помітити і раніше, діюча в Україні система біологічного моніторингу іще щільніше була пов'язана з інформаційними ресурсами світу через Інтернет та через систему взаємообміну інформацією декілька років тому. Це вже новий аспект справи — звітування про стан довкілля на міжнародному рівні.

Системи високотехнологічного моніторингу постійно удосконалюються. Заради справедливості треба відмітити, що на даний час роботи набувають таких великих масштабів, що потребують складних методів узагальнення й обробки. Одночасно не припиняється їхнє застосування, наприклад для укладання національних звітів різної тематики. За їх зразки тепер беруться, зокрема, національні доповіді США, Канади, Австралії, ФРН, Польщі, Угорщини та ін. Підтримка цього підходу до звітування логічно передбачає існування досить розвиненої мережі спостережень: метеорологічної, гідрологічної, сейсмологічної, природоохоронної. Перелік існуючих ГІС в державах, з причин їхньої коштовності (в тому числі у відношенні витрат часу), фактично є індикатором розвиненості тієї чи іншої країни. Сучасна міждержавна мережа моніторингу нараховує тисячі пунктів спостережень, підпорядковані, зокрема, службам WHO, WMO,

NATO, NASA, UNEP (Global Resources Information Database), WCMC, EIONET та ін. Перевагою України є те, що вона постійно узагальнює інформацію про надра і ліси, що може надалі дати новий ефект у контексті збереження біоресурсів. Її інформацію про біоресурси постійно можна знайти в розділах міжнародних звітів про біорізноманіття і ландшафти, ветланди, ліси, рибне господарство. З іншого боку, видно також, що зовсім новим для України був би розділ стосовно інформації та комунікації (як пропонувалось колись у рамках IUCN). Останній напрям пов'язаний із інформаційними технологіями, розвитком Інтернет і створенням кооперативних ГІС. Прикладом такої найпростішої шкільної кооперативної ГІС сьогодні є програма GLOBE, де дані із 35 шкіл в поточному режимі поступають на сайт в Інтернет. Тобто, на рівні шкіл ГІС-технології теж набирають силу. (Мережева інфраструктура Інтернет в Україні сформована сьогодні в основному крупними провайдерами: «Глобал Юкрейн», «Інфоком», «Укртелеком», «Лакінет», «Релком—Україна» та ін. Не є новиною, що цей ринок розвивається безвідносно до справжнього ринку екологічної інформації, оскільки такий іще тільки формується.)

Питання, яке також заслуговує на велику увагу, і яке ми не піднімали в даній роботі — це оперування метаданими. В сучасних ГІС (особливо міжнародного рівня) це є киснем інформаційної системи, яка будується у наближенні до досить жорстких стандартів. Багато хто вже помітив, як важко буває знайти метадані в Україні, особливо якщо вони стосуються комплексного питання — заповідних об'єктів і їхнього оточення. Не виключено, що ГІС-рух усе активніше впливатиме і на цю формальну сторону справи.

Залишається сподіватись, що і у справі екомережебудування напрям із застосування інформаційних технологій (ГІС-аналізу, дистанційного зондуванні, Інтернет) і далі набиратиме оберти, і з розряду екзотичних ця справа перейде в розряд практично необхідних.

1. Збереження і моніторинг біологічного та ландшафтного різноманіття в Україні. — К.: Національний екологічний центр України, 2000.—244 с.
2. Пархісенко Я. В, Придатко В. І., Іщук О. А. та ін. Досвід УЦМЗР з актуалізації тематичних карт із застосуванням зображень, отриманих із супутників «Landsat 4», «Landsat 7» та «Spot» // Матер. міжнар. науково-практичної конф. «ГІС-форум 2001» (Київ, 18—20 грудня 2001 р.). — С. 166—174.
3. Придатко В. И., Ищук А. А., Потапенко Л. С., Штепа Ю. Н. Результаты выполнения проекта по созданию пилот-ГИС для целей мониторинга экосистем и сохранения биоразнообразия в Азово-Причерноморье (версия 2) // Матер. IV Междунар. конф. «Геоинформационные технологии в управлении территориальным развитием», Ялта, 28 мая—1 июня, 2001.—CD: ECOMM.
4. Розбудова екомережі України // Програма розвитку ООН (UNDP). Проект «Екомережі». — К., 1999.—127 с.

Деякі тенденції в дистанційному зондуванні Землі (за зарубіжними матеріалами)

В. С. Готинян, І. С. Дронова

Державний науково-виробничий центр «Природа» НКА України, Київ

В ДНВЦ «Природа» був проведений аналіз зарубіжних матеріалів з метою визначення сучасних тенденцій в розвитку дистанційного зондування Землі. Використані наступні матеріали:

1. Матеріали Міжнародної конференції користувачів ESRI (Сан Дієго, Каліфорнія, США) 2001 р.
2. Матеріали щорічних доповідей CEOS.
3. Веб-сторінки агентств і організацій з ДЗЗ — Orbimage, Infoterra, Space Imaging Eurasia, Landsat, Spot Imaging, Radarsat International, ESA, NASA, NASDA, CNES та ін.
4. Матеріали міжнародного Конгресу з фотограмметрії (Амстердам).
5. A Guide To Using Earth Observation Data for decision Makers, 1999.
6. GIS Development — Remote Environmentsb /July 2001. Vol. 5, Issue 7
7. Spot Magazine, N 32/2000.
8. Веб-сайти організацій і установ, а також пов'язаних з ними закладів зі списку на www.vtt.fi/tte/research/tte1/tte14/virtual

Комітет із супутників спостереження Землі (CEOS) був створений в 1984 р. Його метою є координація спостережень і оптимізація користі від використання ДЗЗ різними країнами, сприяння міжнародному співробітництву в галузі ДЗЗ, обмін

© В. С. ГОТИНЯН, І. С. ДРОНОВА, 2002

досвідом управління, інформацією, створення глобальних банків даних та ін. До членів CEOS входять різні державні космічні агенції, центри космічних досліджень країн Європи, Сполучених Штатів, Канади, Індії, Японії, Китаю, в тому числі й Національне космічне агентство України. Секретаріат Комітету включає Європейське космічне Агентство (ESA), Національну організацію США з дослідження космосу (NASA), а також Агентство з науки та технології (STA) разом із Національним агентством з розвитку космічних досліджень Японії (NASDA). Різні агенції і робочі групи комітету займаються окремим аспектами розвитку ДЗЗ в світі, причому велика увага приділяється питанням глобального спостереження і моніторингу екологічної ситуації.

Якщо розглянути основні питання пленарних засідань CEOS за весь час існування Комітету, можна побачити, як змінювались головні завдання і пріоритети із усвідомленням людством проблем, які до того не поставали так гостро. Від питань про організацію будь-яких спостережень земної поверхні та налагодження надання різних даних і послуг користувачам даних ДЗЗ в 1980-ті роки CEOS перейшов до таких актуальних питань, як створення нових центрів супутникової інформації, розробка ефективних стратегій дослідження глобальних змін клімату, моніторингу стихійних явищ, розвиток партнерства з найбільшими установами і агенціями світу та ін. Надзвичайно велике значення надається міжнародному співробітництву та допомозі країнам, що розвиваються.

Хоча і не всі держави світу інтенсивно використовують дистанційне зондування, географічні межі розповсюдження технологій та засобів ДЗ постійно розширюються. Крім вищеназваних організацій, у світі працюють також Австралійський центр ДЗЗ (ACRES), Національне агентство з дистанційного зондування в Індії, Таїландський центр дистанційного зондування, Центри ДЗЗ при національних університетах Сінгапура і Тайваня, .Alado Imagens de Satelite e Informatica Ltda в Бразилії та ін. Декілька центрів, які в різних напрямках використовують інформацію супутників та технології ДЗЗ, працюють в Африці: Africover Project, відділ CEOS в Найробі, Кенія; Південноафриканський кооперативний центр дистанційного зондування, а також програма екологічних досліджень і роботи з інформацією про довкілля EIS-SSA.

Важливою тенденцією використання інформації ДЗЗ на сьогодні є пов'язана з нею комерційна діяльність: поширення даних зображень, надання послуг з інтерпретації і різних видів обробки інформації, торгівля програмним забезпеченням та ін. В США законодавство, яке дозволяло використовувати інформацію ДЗЗ в комерційних інтересах, почало розроблятись ще в 1980-ті роки, а в жовтні 1992 р. Конгресом США був прийнятий Акт про політику з дистанційного зондування Землі. Цей закон звернувся до рішення 1984 р. про комерціалізацію системи «Landsat» і визнав корисність «дистанційного зондування Землі з космосу» для науки, національної безпеки, економічних та соціальних аспектів. На додаток, Акт дозволив створення приватних космічних систем дистанційного зондування, при цьому не передбачалися обмеження на просторову роздільну здатність зображень.

Рішення, прийняті в 1992 і 1994 рр., вплинули на активність приватного сектору і розвиток торгівельних відносин стосовно інформації та матеріалів ДЗЗ. На сьогодні в світі працюють такі організації, як «Orbimage», «Space Imaging International», «Spot Image», «Астріум» (Infoterra), «Radarsat International», «European Space Imaging», відділи NASA та багато інших, які займаються збором космічної інформації та даних ДЗЗ, їхнім розповсюдженням на передбачених міжнародним законодавством засадах. Для полегшення комерційної діяльності і підвищення надійності великі компанії намагаються вводити спеціальні умови ліцензування користувачів, створювати невеликі представництва для роботи з клієнтами на місцях, випускати щорічні звіти, каталоги і т. ін.

Однією з найвідоміших в світі є організація Space Imaging International та її філії в різних частинах світу, які займаються інформацією ДЗЗ з супутника IKONOS. Спектр сфер застосування цих даних є надзвичайно широким — від картографії, пошуку природних ресурсів та аналізу екологічної ситуації до телекомунікації, планування, управління і національної безпеки держав.

Ліцензіювання інформації ДЗЗ є надзвичайно важливим на сьогодні аспектом комерційної діяльності в цій сфері. Процедура і умови оголошуються в спеціальних правилах кожної організації. Керівні органи агентств Space Imaging Eurasia і «Spot Image Corporation» зазначають, що хоча з одного боку світові організації роблять все можливе, щоб відкрити якомога більше інформації користувачам, з іншого виникають спроби нелегально продавати інформацію, яка є на Веб-сайтах тощо. Для цього вводяться такі заходи, як платне користування певними Веб-каталогами, спеціальні стягнення і штрафи за порушення умови «кінцевого споживача» (наприклад, замовник інформації у Space Imaging Eurasia, згідно з умовами ліцензіювання, не має права надавати і поширювати цю інформацію далі без погодження агентства, яке її надало). Нещодавно «Spot Image Corporation» заключило договір з Національним агентством знімків і картування в США (NIMA) про включення в спеціальний Веб-сайт останнього більше 5000 архівних

зображень з КА «Spot».

Цінова політика торгівлі матеріалами ДЗЗ залежить від того, яка організація надає інформацію, з якого джерела-супутника, замовляються нові чи архівні матеріали, прості знімки чи ортотрансформовані і т. д. Так, ціни на знімки з Ikonos (агентство Space Imaging Eurasia) з роздільною здатністю 1 м (панхроматичні) та 4 м (багатозональні) коштують від 35—40 дол. США за км^2 території на зображенні, в DigitalGlobe (супутник «QuickBird») — від 30—80 дол. США за км^2, але ціна може змінюватись в залежності від кількості замовленої інформації. Архівні знімки коштують значно дешевше, ніж нові. Деякі агентства, як, наприклад, ACRES, RADARSAT International, Orbimage (Orbview-1, -2) призначають ціну за конкретні знімки. В залежності від роздільної здатності ціна за знімок 100×100 км^2 варіює від 900—3000 дол. США і вище, архівні знімки можуть в різних агентствах коштувати від 500-600 і вище. Цінові тенденції спрямовані на полегшення доступу користувачів до інформації, тому багато організацій («Spot Image Corporation», DigitalGlobe, Space Imaging Eurasia) впроваджують різні системи знижок на продукцію, особливо більш давню, яка теж широко використовується для вирішення різних проблем.

Технологія отримання даних ДЗЗ, їх подальшої інтерпретації та обробки теж постійно розвивається і змінюється в залежності від завдань сьогодення. Велику увагу приділяють такому параметру, як просторова роздільна здатність зображення. Знімки деяких сучасних супутникових систем мають роздільну здатність краще ніж 1 м, а процес первинної обробки на новітньому обладнанні може займати всього декілька хвилин і навіть секунд. Space Imaging Eurasia досягає високої якості зображень завдяки фіксації камер на супутнику (в процесі зйомки рухаються не камери, а вся система разом, що дозволяє уникнути небажаних зсувів зображень при гальмуванні супутника або відключенні системи).

«Spot Image Corporation» займається розробкою нової програми Patchwork, яка дозволяє отримувати зображення майже без хмарного покриву (менше 10 %) навіть в тих регіонах, де хмари заважають оптичним спостереженням практично протягом цілого року. До того ж, технологія Patchwork оснащена різними можливостями обробки інформації, комбінування зображень і т.д.

Програмне забезпечення обробки матеріалів ДЗЗ розробляється окремими компаніями для інформації з конкретних супутників. Провідними серед них на сьогодні є «ERDAS Imagine», Multi-Sensor Software (Orbimage), TELIMAGO (Gael, Франція), Geo Ortho Kit (Space Imaging) та ін. Серед організацій, які також займаються технологіями ДЗЗ — ESRI, Speck Systems Ltd, Z/I Imaging's ImageStation OrthoPro™, PCI Geomatics', Geomatica™, OrthoEngine та багато інших.

На сьогодні використання інформації дистанційного зондування Землі тісно пов'язане з розвитком геоінформаційних систем та технологій (ГІС). Це включає і створення баз даних, і розробку програмного забезпечення (як загальних програм, так і призначених для конкретних проблем в окремих регіонах). Часто знімки, ортотрансформовані зображення та інші дані ДЗЗ слугують основою банків даних та розробки ГІС або допомагають у вирішенні конкретних завдань. На основі даних ДЗЗ, наприклад, Інженерний відділ Міністерства оборони США розробляє ГІС-моделі для аналізу рослинного покриву і покриття земель на різних військових базах, особливостей утворення тіні та ін. з метою розробки спеціальних карт і класифікацій земельного покриву.

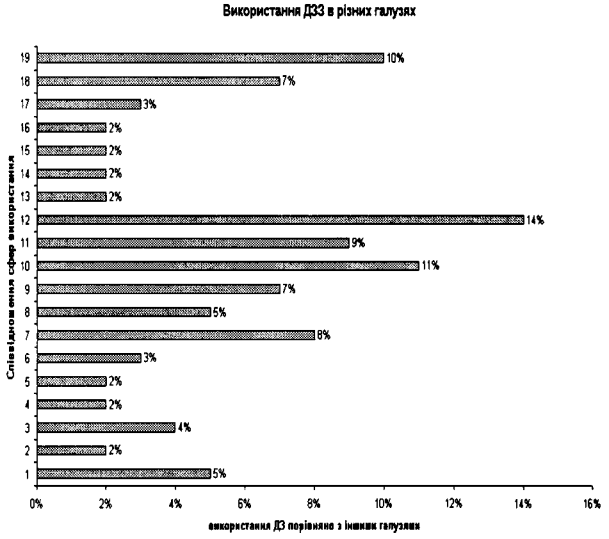
Аналіз доповідей останніх світових конференцій з дистанційного зондування та ГІС та близько 150 Веб-сайтів світових організацій і агентств з ДЗЗ свідчить про те, що тенденція інтеграції даних ДЗЗ та ГІС-технологій набуває все ширшого масштабу. Головні прикладні аспекти використання матеріалів ДЗЗ та ГІС-картографування, телекомунікації, планування транспортних мереж, розвідування покладів корисних копалин, ландшафтний і просторовий аналіз природних систем. Звичайно, це не заважає розвитку традиційних напрямків застосування засобів та інформації ДЗЗ. Картографування різних територій, зокрема створення тематичних карт, дослідження характеру і причин зміни земної поверхні в часі та під дією різних чинників залишаються важливими сферами використання матеріалів дистанційної зйомки. Таблиця та рисунок ілюструють застосування дистанційного зондування в різних сферах.

Отже, спектр застосування інформації дистанційного зондування Землі є надзвичайно широким. Однак можна побачити, що головні тенденції сьогодення витікають із найбільш актуальних проблем та завдань. В першу чергу це питання екологічного характеру — спостереження за станом природних територій, управління екологічною ситуацією, яке включає глобальні зміни клімату, стан природних ресурсів суходолу й Світового океану.

Використання матеріалів ДЗЗ дозволяє слідкувати за станом лісового покриву та виявляти темпи скорочення природних територій в світі, спостерігати за тенденціями зміни промислово цінних популяцій креветок, риби в морях та океанах (за матеріалами Європейського космічного агентства). Багато екологічних відділів при світових агентствах з ДЗЗ займаються спостереженням за змінами озо-

Сфери застосування інформації ДЗЗ

1. Сільське господарство	5 %
2. Економічні дослідження	2 %
3. Картографування	4 %
4. Клімат і погода	2 %
5. Створення баз даних і автоматизація управління	2 %
6. Глобальні системи пошуку	3 %
7. Екологія, археологія, збереження пам'яток	8 %
8. Вивчення і розвідування природних ресурсів	5 %
9. Пожежі, стихійні явища, природні катастрофи	7 %
10. Управління екологічною ситуацією	11 %
11. Застосування в державному управлінні	9 %
12. Лісова і заповідна справа і рибне господарство	14 %
13. Географічні дослідження	2 %
14. Здоров'я населення, дослідження епідеміологічної ситуації	2 %
15. Міжнародне співробітництво	2 %
16. Системи пошуку місцезнаходжень об'єктів	2 %
17. Вивчення Світового океану	3 %
18. Використання ДЗ для розвитку ГІС-технологій	7 %
19. Водокористування і дослідження стану водних ресурсів	10 %



Застосування ДЗ в різних сферах

нового шару планети, розповсюдженням забруднень в навколишньому середовищі і виявленням негативних ефектів антропогенної діяльності. Серед таких організацій — EARS (Центр екологічних досліджень та дистанційного зондування, Нідерланди), Відділ Геофізичних та екологічних досліджень (GER) в Нью-Йорку, Національна Організація з досліджень океану та атмосфери (NOAA) при NASA в США, Центр глобальних екологічних досліджень при NASDA в Японії, велика кількість центрів екологічних досліджень за допомогою дистанційного зондування при університетах багатьох держав.

Засоби ДЗЗ є надзвичайно зручними для організації різних видів екологічного моніторингу — від ландшафтного в окремих регіонах до, наприклад, моніторингу глобального потепління. Тому цими інструментами користуються Інститут всесвітнього спостереження (Worldwatch Institute, www.worldwatch.org) та інші екологічні установи при ООН, а також в окремих державах. Дослідниками Terrestrial Remote Sensing Flagstaff Field Center (Арізона, США) було проведене обстеження декількох зон коралових рифів Світового океану, стан яких, як відомо, є індикатором глобальних змін клімату. Висновки цих досліджень можуть стати основою прогнозування і розробки природоохоронних заходів (terraweb.wr.usgs.gov). Дослідники Центру екологічного дистанційного зондування в Японії (CEReS) досліджували динаміку опустелювання в глобальному масштабі в 2000—2001 р. (GIS Development — Remote Environments.—July 2001.—5, Issue 7). Результати цієї роботи зробили суттєвий внесок в розвиток екологічного картографування, а з іншого боку — виявили деякі закономірності процесу деградації природних земель і переходу в пустельні території, головні фактори (соціальні, економічні, кліматичні й фізичні), які на цей процес впливають.

Не менш важливим напрямком спостережень ДЗЗ є аналіз лісових пожеж, природних катастроф та стихійних явищ з подальшим прогнозуванням подібних ситуацій в майбутньому. Практично при кожній державній та світовій організації або установі з ДЗЗ є відділи, які збирають інформацію, створюють бази і банки даних, роблять відповідні дослідження і прогнози щодо таких явищ і надзвичайних ситуацій. Глобальний центр моніторингу лісових пожеж (GFMC) при ООН займається спостереженням за ситуацією в цій сфері по всьому світові, використовуючи дані дистанційної зйомки, та створює бази даних і допомагає координувати моніторингові заходи в окремих регіонах планети.

Важливою сферою використання дистанційних методів зйомки залишається сільське господарство, тому що воно пов'язано із продовольчим забезпеченням населення світу. Аспекти, до яких мають відношення матеріали ДЗЗ, надзвичайно різноманітні — аналіз сільськогосподарських угідь та пасовищ, спостереження за змінами рослинних культур через різні причини (засуха, шкідники, хвороби), планування комерційних і торгових мереж сільського господарства, створення відповідних баз даних. Серед інших стратегічних напрямків можна виділити питання національної безпеки, економічне та соціальне планування, розробку стратегій

регіонального управління. Досить цікавими є нові дослідження компанії «Spot Image Corporation». По-перше, на борту супутника «Spot-4» (запущений в 1998 р.) встановлений спеціальний прилад VEGETATION, за допомогою інформації з якого виявляють стан угідь, планують іригаційні системи, своєчасно встановлюють наявність шкідників на полях (зокрема саранчі) та попереджують збитки від комах, хвороб, забруднень тощо. По-друге, різні ефективні моніторингові системи, які розробляються на основі даних компанії, допомагають окремим фермерським господарствам постійно слідкувати за станом сільськогосподарських територій, приймати відповідні рішення стосовно управління землями і діяльністю на них. Компанія заключила ще в грудні 1999 р. договір з організаціями CNES, Scot, INRA, Astrium, Aventis Cropscience щодо розробки технологій для забезпечення більш правильної сільськогосподарської діяльності в світі (Spot Magazine, N 32/2000).

Медичні дослідження і аналіз епідеміологічної ситуації на сьогодні також не обходяться без дистанційного зондування. При Всесвітній Організації охорони здоров'я створено спеціальний Центр використання ДЗ та ГІС для питань здоров'я населення. В Каліфорнійському Університеті (США), було проведено дослідження різної інформації супутників (здебільшого багатозональні та інфрачервоні знімки «Landsat-7 ETM» та «Landsat-5 TM»). Аналіз різних екологічних складових, що впливають на життєдіяльність і характер розповсюдження збудників хвороб, дозволяє прослідкувати тенденції епідеміологічної ситуації (наприклад, коли йдеться про збудників, що народжуються в певному водному або грунтовому середовищі). Матеріали дистанційної зйомки також дозволяють визначати ризик виникнення захворювань в людських поселеннях, населених пунктах, картографувати ризик. Ці дані, в свою чергу, є важливими при демографічному плануванні, прогнозуванні майбутніх міст тощо. Інформація, отримана з супутників ДЗ, є корисною для впровадження ефективного моніторингу.

Надзвичайно широким є спектр використання матеріалів ДЗЗ в державному управлінні. Можна виділити такі аспекти:

— національна безпека, військові цілі, кримінальна ситуація;
— створення різних спеціальних карт;
— кадастри і обліки земель;
— перепис населення.

Особливо ефективним тут є включення інформації ДЗЗ в ГІС-системи. Наприклад, в Денвері (США) проводилися дослідження, в яких цифрові ортотрансформовані зображення були основою ГІС-моделей планування міської зони і розробки кадастрів.

Слід також зазначити, що велика увага питанням ДЗЗ надається в освіті. Багато навчальних закладів не тільки впроваджують окремі курси чи навчальні програми з ДЗЗ, а й створюють свої центри з дистанційного зондування та його використання в різних видах теоретичних та прикладних досліджень — Центр ДЗ Бристольського університету, NERC Remote Sensing and GIS Unit (RAGU), Плімутський університет, Sheffield Centre for Earth Observation Science (SCEOS) в Шеффілдському університеті (Велика Британія), Центр дистанційних зображень, зондування і обробки (CRISP) при Національному університеті в Сінгапурі та багато інших. Філії міжнародних університетів (наприклад Міжнародний університет в Нідерландах) пропонують різноманітні коротко- та довгострокові курси, які дозволяють за певний термін отримати знання та навички в сфері технологій та засобів ДЗЗ, а також ознайомитися з сучасними напряками розвитку ДЗ- та ГІС-технологій і важливими завданнями сьогодення.

Таким чином, дистанційне зондування Землі залишається надзвичайно важливим інструментом збору цінної інформації про різні сфери існування людства і планети Земля. Головні напрямки розвитку ДЗЗ визначаються першочерговими проблемами і пріоритетами сучасного технологічного розвитку. Тому матеріали ДЗЗ знаходять сьогодні широке застосування в галузях дослідження екологічної ситуації, природних ресурсів та стану територій світу з одного боку, а з іншого — в створенні інформаційних систем та автоматизованих систем управління природокористуванням. Велику роль для ефективності вирішення проблем грає міжнародне співробітництво, взаємний обмін досвідом і технологіями між країнами та організаціями на засадах комерційної діяльності або допомоги. Постійний розвиток технологій і засобів ДЗЗ та підвищення ефективності використання їх у розв'язанні конкретних завдань дають підстави для оптимістичних прогнозів щодо майбутнього розвитку ДЗЗ.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 70—72

Опыт создания цифрового изображения Украины по космическим снимкам высокого разрешения

В. С. Готынян, И. О. Буйницкий, Н. А. Минкевич

Государственный научно-производственный центр «Природа», Киев

В ГНПЦ «Природа» выполнена работа по созданию цифрового изображения всей территории Украины по данным космической съемки высокого разрешения путем монтажа отдельных снимков, полученных камерой КАТЭ-200 со спутника «Ресурс-Ф1».

Обработка информации осуществлялась при помощи геоинформационной системы «ERDAS Imagine 8.4».

Работа по составлению цифрового изображения состояла из нескольких этапов:

1. Подбор снимков и оценка их качества.
2. Преобразование снимков в электронные файлы.
3. Синтез каналов и геометрическая коррекция снимков.
4. Составление мозаики изображений.
5. Отображение векторных данных.
6. Зарамочное оформление и подготовка к печати твердой копии цифрового изображения.

Первый этап. При подборе снимков необходимо учитывать, что исходные материалы должны удовлетворять требованиям детальности и обзорности и быть представлены в нескольких информативных спектральных диапазонах. Детальность предполагает опознание по материалам съемки минимальных объектов, подлежащих дешифрированию. В большинстве случаев объекты выявляются по совокупности природных индикаторов, размеры которых примерно на порядок меньше, чем сам объект.

Способность эффективно различать индикаторы при дешифрировании обеспечивается при пространственном разрешении изображения 810 лин/мм, что в пересчете для масштаба 1:200 000 дает разрешение на местности 2030 м. Обзорность обеспечивается снимками, на которых просматривается значительная часть территории.

Вышеназванным требованиям удовлетворяют многозональные снимки, полученные со спутников «Ресурс-Ф1» фотокамерой КАТЭ-200 (таблица).

Параметры многозональных снимков, полученных со спутников «Ресурс-Ф1» фотокамерой КАТЭ-200

Спектральный диапазон, нм	500—600 600—700 700—900
Разрешающая способность, м	 20—30 15 25—35
Площадь съемки за одну экспозицию, км^2	32 000
Фокусное расстояние, мм	200
Формат кадра, мм	180×180
Высота съемки, км	275

Второй этап. Сканирование отобранных снимков выполнено на сканере высокого уровня UMAX Power Look 2100 (сканер не фотограмметрический) в автоматическом режиме с разрешением 1200 точек на дюйм с использованием программы Magis Scan. Отсканированным поканально в формате TIFF снимкам присвоено имя файла, соответствующее номеру фильма, кадра и канала.

В архиве ГНПЦ «Природа» находится большое количество таких снимков. Для покрытия всей территории Украины понадобилось более пятидесяти снимков. Фрагмент нормализованного изображения снимка КАТЭ-200, увеличенный до масштаба 1:200 000, приведен на рис. 1.

Для каждого снимка создана папка, названная номером фильма и кадра. Один трехканальный снимок занимает приблизительно 210 MB. Таким образом были отсканированы, систематизированы и записаны на CD-R все подготовленные для составления мозаики снимки.

Следует подчеркнуть, что для обработки снимков, полученных фотографическими системами, сканирование — важнейший этап, и результаты некачественного сканирования зачастую нельзя исправить никакой последующей обработкой.

Третий этап. Для работы в программе «ERDAS Imagine» отсканированные снимки были переведены в соответствующий данной геоинформационной системе img-формат, и выполнен синтез всех трех спектральных диапазонов.

Можно синтезировать не один, а несколько вари-

© В. С. ГОТЫНЯН, И. О. БУЙНИЦКИЙ, Н. А. МИНКЕВИЧ, 2002

Рис 1. Фрагмент снимка КАТЭ-200 (масштаб 1:200000

Рис. 2. Мозаика десяти космических снимков западной части Украины

антов цветного изображения, причем каждый вариант синтеза содержит несколько отличную информацию о снятых объектах. На одном лучше выделяются дороги и сооружения, на другом — водные объекты, на третьем — растительность. Нами был использован вариант синтеза каналов I, III, II.

Дальнейшая обработка изображения заключалась в выполнении геометрической коррекции снимков. Процедуры геометрической коррекции предназначены для устранения или минимизации искажений, вызванных различной высотой и ориентацией спутника, наклонным углом визирования съемочной аппаратуры, кривизной земной поверхности и другими геометрическими факторами.

Основной метод геометрической коррекции — трансформирование исходного изображения в заданную картографическую проекцию с последующей точной координатной привязкой. При трансформировании происходит геометрическое преобразование снимка и пересчет значений пикселов на новую сетку растра. Само по себе трансформирование не дает возможности использовать снимок совместно с цифровыми картами и другими данными в реальных координатах. Необходимо еще «сообщить» снимку информацию о привязке его к реальной координатной системе или к какой-то относительной системе координат.

Есть разные уровни геометрического трансформирования снимков и методики проведения трансформирования, использующие различный математический аппарат и дополнительную информацию. Примененный нами метод с использованием полиномов (полиномиальная ректификация) позволяет получить достаточно точную привязку за счет трансформирования с помощью опорных точек с точно известными кординатами.

Количество необходимых опорных точек для трансформирования полиномами разного порядка определяется по формуле

$$n = (t + 1)(t + 2)/2 ,$$

где n — количество опорных точек, t — степень полинома.

Нами было выполнено трансформирование с использованием полинома третьей степени и, как правило, не менее 20 опорных точек на снимок. Средняя квадратичная ошибка определения координат опорных точек не превышала 1 пиксел. Для уменьшения размера выходного файла точность была понижена до 50 м, что вполне достаточно для изображения масштаба 1:750 000. После завершения процесса трансформирования все точки снимка получали реальные географические координаты. Для проверки качества привязки одновременно открывались несколько смежных снимков и при большом увеличении изображение просматривалось в пределах полосы перекрытия и стыка снимков. Объекты на местности совпадали при увеличении изображений до масштаба 1:50 000 и крупнее.

Координатная привязка и геометрическое трансформирование снимков — процессы трудоемкие и требующие определенных навыков. Здесь сказываются все погрешности, связанные с предыдущей обработкой снимка, начиная с фотохимической, условиями их хранения, сканирования и синтезирования изображения. Этот этап работы занял основную часть времени создания цифрового изображения Украины.

Четвертый этап. После выполнения геометрической коррекции отдельных снимков стало возможным формирование единого файла мозаики изображения.

Чтобы определиться с полосой перекрытия между снимками, все подготовленные к монтажу снимки были просмотрены в режиме виртуальной мозаики. Понадобилось 53 снимка, чтобы перекрыть территорию Украины, все эти снимки полностью или частично были задействованы при сшивке.

После сшивки снимков, снятых в одно и то же время, получилось достаточно однородное изображение, на котором линия сшивки практически не видна (рис. 2). К сожалению, сгладить контраст изображения между смежными снимками по всей территории не удалось, так как более половины снимков получены в разное время года (с мая по сентябрь). Разновременные снимки отображают неодинаковые фенологические фазы развития растений, погодные условия, этапы сельскохозяйственных работ и добиться равномерного перехода цветовой гаммы трудно.

Полученное изображение преобразовано в коническую равнопромежуточную проекцию. При этом размер выходного файла составил 1.7 Гб.

Пятый этап. Для отображения государственной границы, границ областей и контуров областных городов была использована картографическая основа электронной карты. В геометрическом отношении векторные слои достаточно точно совпадают с растровой картой. Подписи названий городов выполнены вручную.

Шестой этап. На последнем этапе работ к изображению добавлена координатная сетка, зарамочное оформление и выполнена растеризация в img-формате. Созданное цифровое изображение Украины может быть использовано для решения широкого круга задач в области водного, лесного, сельского хозяйства, экологии и охраны природы. В частности, в области геологии возможно применение его в качестве дистанционной основы для составления геологических карт масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 73—76

ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ ДЗЗ

Обоснование алгоритма формирования состава космического аппаратурного комплекса для выполнения научно-прикладной программы ДЗЗ

А. Д. Федоровский[1], В. П. Зубко[2], В. Г. Якимчук[1]

[1]Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев
[2]Национальное космическое агентство Украины, Киев

Аппаратурный комплекс (АК) космического аппарата дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) должен состоять из приборов, параметры которых обеспечат регистрацию соответствующих информативных признаков (характеристик), необходимых для решения тематических задач научно-прикладной программы ДЗЗ. Регистрация всего многообразия информативных признаков достигается включением в состав АК приборов различного типа.

Задача состоит в обосновании алгоритма, который позволит на основе совместного анализа информативных признаков тематических задач и существующих и вновь проектируемых приборов ДЗЗ сформировать комплекс аппаратуры с параметрами, обеспечивающими выполнение тематических задач и программы ДЗЗ в целом с наибольшей вероятностью.

Поставленную задачу предлагается решить в два этапа. На первом этапе из всего множества вариантов АК исключаются те, которые не удовлетворяют конструктивным требованиям (вес, габариты, надежность, ресурс и др.). На втором этапе оценивается эффективность оставшихся вариантов АК при решении тематических задач, и по максимальному значению соответствующего критерия выбирается наилучший из них [3].

Существование АК, который являлся бы наилучшим одновременно по всем конструктивным параметрам, маловероятно. Поэтому задача сводится к нахождению варианта АК, который может не являться оптимальным ни по одному из частных критериев, но оказывается наиболее приемлемым для всего множества критериев (компромиссный вариант) [2].

Сложность решения задачи заключается в необходимости учитывать такие проблемы, как противоречивость критериев, различия в их размерности и масштабности, неравноценность критериев. Это приводит к необходимости нормализации критериев, введения количественных величин, позволяющих сравнивать критерии различной размерности, учитывать требования максимума и минимума, предпочтения по важности критериев.

В используемом ниже методе решения многокритериальных задач в качестве монотонного преобразования выбирается функция относительных потерь $\omega[f_i(B_c)]$, которая уравнивает порядок относительных отклонений от оптимальных значений по всем критериям и приводит их к безразмерной форме. Предпочтение критериев друг перед другом определяется весовыми коэффициентами [1].

Пусть $B = \{B_c\}$ — множество возможных вариантов АК, где B_c — c-й вариант АК, $c = 1, 2, ..., R$, R — количество АК, $f = \{f_i\}$ — множество конструктивных параметров (критериев), где $i = 1, 2, ..., D$. Первые d критериев необходимо максимизировать, остальные $D - d$ — минимизировать. Тогда

$$\omega_i(f_i(B_c)) = \frac{f_i^0 - f_i(B_c)}{f_i^0 - f_i(B_c)_{\min}} \quad (1)$$

(при $i = 1, ..., d$),

$$\omega_i(f_i(B_c)) = \frac{f_i(B_c) - f_i^0}{f_i(B_c)_{\max} - f_i^0} \quad (2)$$

(при $i = d + 1, ..., D$),

где $f_i(B_c)$ — значение i-го критерия для B_c-го варианта АК, f_i^0 — значение i-го критерия для

© А. Д. ФЕДОРОВСКИЙ, В. П. ЗУБКО, В. Г. ЯКИМЧУК, 2002

оптимального варианта АК, $f_i(B_c)_{min}$ и $f_i(B_c)_{max}$ — минимальное и максимальное значения i-го критерия, в случае, когда i-й критерий соответственно максимизируется или минимизируется. Из выражений (1) и (2) следует, что функция $\omega_i[f_i(B_c)]$ является монотонным преобразованием $f_i(B_c)$, и поэтому множества эффективных вариантов для множеств f и ω совпадают.

Компромиссным решением называется такой квазиоптимальный вариант B^k, который удовлетворяет одновременно D уравнениям

$$\rho_1\omega_1(f_1(B^k)) = \ldots = \rho_i\omega_i(f_i(B^k)) = \ldots = \\ = \rho_D\omega_D(f_D(B^k)) = k_0, \quad (3)$$

где k_0 — параметр, определяющий степень близости компромиссного (квазиоптимального) варианта АК к оптимальному варианту по отдельным критериям; ρ_i — безразмерные весовые коэффициенты, учитывающие предпочтение между критериями множества f, причем

$$\rho_i > 0; \qquad \sum_{i=1}^{D}\rho_i = 1. \quad (4)$$

Если критерии равноценны, $\rho_i = 1/D$ для всех $i = 1, \ldots, D$.

В силу дискретности множества $\{B_c\}$ может не существовать варианта системы, удовлетворяющего равенству (3). В этом случае компромиссное решение состоит в нахождении квазиоптимального варианта АК, удовлетворяющего неравенствам

$$\rho_i\omega_i(B_c) \le k_0, \; i = 1, \ldots, D. \quad (5)$$

Чтобы найти такой вариант, будем решать задачу минимизации обобщенного критерия $W(B_c)$, который представляет собой суммарное отклонение от оптимальных значений по всем критериям в соответствии с заданным предпочтением (4). Математическое представление этой задачи выглядит следующим образом

$$\min_{B_c \in V} W(B_c) = \\ = \min_{B_c \in V}\left\{\sum_{i=1}^{d}\rho_i\frac{f_i^0 - f_i(B_c)}{f_i^0 - f_i(B_c)_{min}} + \sum_{i=d+1}^{D}\rho_i\frac{f_i(B_c) - f_i^0}{f_i(B_c)_{max} - f_i^0}\right\}, \quad (6)$$

при ограничениях

$$f_i(B_c) \ge f_i^* = f_i^0 - k_0\frac{f_i^0 - f_i(B_c)_{min}}{\rho_i}; \; i = 1, \ldots, d, \quad (7)$$

$$f_i(B_c) \le f_i^* = f_i^0 + k_0\frac{f_i(B_c)_{max} - f_i^0}{\rho_i}; \; i = d+1, \ldots, D. \quad (8)$$

Здесь f_i^* — допустимое значение i-го критерия, заданное из технических требований на параметры АК. Ограничения взяты в виде нестрогих неравенств, поскольку может вообще не существовать такого варианта, для которого выполняются равенства в ограничениях (7) и (8) одновременно для всех $i = 1, \ldots, D$ при $0 < k_0 < 1$.

Нахождение квазиоптимальных вариантов АК и исключение из множества $\{B_c\}$ вариантов АК, не соответствующих заданным конструктивным параметрам, происходит в следующем порядке:

1. Определение для каждого варианта прибора значений частных критериев: $f_{it(q)}$ — значение i-го критерия для q-го прибора t-го типа, $i = 1, \ldots, D$.

2. Упорядочение элементов в строках таблиц значений критериев TK_i по возрастанию, если критерий f_i минимизируется, и по убыванию, если максимизируется.

3. Определение варианта $B_c(f_i^0)$, оптимизирующего критерий f_i, и вычисление значения критерия оптимального варианта по формуле

$$f_i^0 = \sum_{t=1}^{T} f_{it(q)}^0,$$

где $f_{it(q)}^0$ — минимальное значение i-го критерия (в случае минимизации критериев) для q-го прибора t-го типа, т. е. суммирование элементов первого столбца упорядоченной таблицы TK_i.

4. Определение максимального (наихудшего при минимизации критерия) варианта $B_c(f_{i\,max})$ и вычисление значения критерия по наихудшему варианту.

$$f_i(B_c)_{max} = \sum_{t=1}^{T} f_{itmax} = \sum_{t=1}^{T} f_{iq(e)},$$

где f_{itmax} — наихудшее значение i-го критерия q-го прибора t-го типа, т. е. крайние значения $f_{iq(e)}$ в строке упорядоченной таблицы TK_i.

5. Проверка выполнения неравенств

$f_i^0 \le f_i^*$ — если критерий минимизируется,

$f_i^0 \ge f_i^*$ — если критерий максимизируется.

6. Вычисление допустимых значений критериев на типы приборов по формуле

$$f_{it}^* = f_i^* - f_i^0 + f_{itq}^0,$$

где f_i^0 — значение i-го критерия для оптимального варианта АК, полученного после первого упорядочения таблиц значений критериев (п. 2); f_{itq}^0 — значения критерия q-го прибора, t-го типа, входящего в оптимальный вариант АК.

7. Усечение вариантов приборов одновременно по всем критериям из условия

$f_{itq} \le f_{it}^*$ — если критерий минимизируется,

$f_{itq} \ge f_{it}^*$ — если критерий максимизируется

и проверка существования пересечения $B_c \ne 0$.

8. Формирование всех возможных конструктивных вариантов АК $\{B_c\}$ и вычисление значений критериев $f_i(B_c)$ для каждого варианта, где $c = 1, \ldots, R^k$ (R^k — количество сформированных конст-

руктивных вариантов АК).

9. Проверка попадания в допуск одновременно по всем критериям

$f_i(B_c) \le f_i^*$ — если критерий минимизируется,

$f_i(B_c) \ge f_i^*$ — если критерий максимизируется.

10. Проверка на эквивалентность — есть ли варианты с одинаковыми или близкими значениями k_0. Если такой вариант единственный, то этот вариант есть решение задачи, т. е. квазиоптиальный конструктивный вариант АК. Если есть эквивалентные варианты, то переходим к п. 11.

11. Вычисление значений обобщенного критерия по формуле (6) для каждого эквивалентного варианта АК ($B_c^э$).

12. Из множества эквивалентных вариантов АК выбираются те, для которых значения $W_c < W^*$, где W^* пороговое значение, заданное из конструктивных требований на параметры АК. После отсева бесперспективных вариантов составляется перечень эквивалентных вариантов АК, удовлетворяющих допустимым значениям одновременно по всем конструктивным критериям.

На втором этапе для каждого эквивалентного варианта АК вычисляются оценки их эффективности при решении тематических задач научно-прикладной программы ДЗЗ, по максимальным значениям которых выбирается искомый вариант состава АК. Для таких оценок используется функция принадлежности F, которая показывает эффективность использования каждого аппаратурного комплекса для решения тематических задач и программы ДЗЗ в целом [4].

Обозначим $M = \{M_p\}$ — научно-прикладная программа ДЗЗ, состоящая из множества подпрограмм, где M_p — p-я подпрограмма; $p = 1, 2, ..., h$ (h — количество подпрограмм). $A(M_p) = A\{A_{pl}\}$ — множество тематических задач p-й подпрограммы, где A_{pl} — l-я задача p-й подпрограммы, $l = 1, 2, ..., k_p$ (k_p — количество задач p-й подпрограммы). $a(A_{pl}) = \{a_{plj}\}$ — множество характеристик (информативных признаков) l-й задачи p-й подпрограммы, где a_{plj} — j-я характеристика l-й задачи p-й подпрограммы, $j = 1, 2, ..., m_{pl}$ m_{pl} — количество характеристик l-й задачи p-й подпрограммы). $b(B_c) = \{b_{cj}\}$ — множество параметров c-го АК, где b_{cj} — j-й параметр c-го АК.

Чтобы оценить эффективность АК при решении каждой задачи, определим соответствие параметров c-го эквивалентного АК ($B_c^э$) характеристикам l-й задачи, p-й подпрограммы (A_{pl}) с помощью функции принадлежности

$$F_1(B_c^э, A_{pl}) = \sum_{j=1}^{m(pl)} \rho(a_{plj}, A_{pl}) G(b_{cj}, a_{plj}); \qquad (9)$$

$$p = 1, ..., h; \quad l = 1, ..., k_p; \quad c = 1, ..., R^э,$$

где $G(b_{cj}, a_{plj})$ — функция соответствия j-го параметра c-го АК (b_{cj}) j-й характеристики l-й задачи p-й подпрограммы (a_{plj}), ρ_{ilj} — весовой коэффициент важности j-й характеристики для l-й задачи p-й подпрограммы. Функция соответствия, показывает степень соответствия значений параметров АК соответствующим характеристикам тематических задач

$$G(b_{cj}, a_{plj}) = [1 - S(b_{cj}, a_{plj})]; \qquad (10)$$

где $S(b\}_{cj}, a_{plj})$ — функция, характеризующая близость значений параметров АК соответствующим характеристикам тематических задач.

Функция близости для j-го параметра q-го прибора (b_{tqj}) к j-й характеристике l-й задачи p-й подпрограммы (a_{plj}) определяется в соответствии с выражениями:

— для параметров прибора, значения которых максимизируются, т. е. чем больше значение параметра, тем больше вероятность решения задачи

$$S(b_{cj}, a_{plj}) = \begin{cases} (a_{plj} - b_{cj})/a_{plj}, & a_{plj} \ge b_{cj}, \\ 0, & a_{plj} < b_{cj}; \end{cases} \qquad (11)$$

— для параметров АК, значения которых минимизируются, т. е. чем меньше значение параметра АК, тем больше вероятность решения задачи

$$S(b_{cj}, a_{plj}) = \begin{cases} (b_{cj} - a_{plj})/b_{cj}, & a_{plj} < b_{cj}, \\ 0, & a_{plj} \ge b_{cj}; \end{cases} \qquad (12)$$

— для параметров АК, значения которых должны попадать в определенный диапазон между нижней $\underline{a}_{plj}$ и верхней $\overline{a}_{plj}$ границами

$$S(b_{cj}, a_{plj}) = \begin{cases} (b_{cj} - \overline{a}_{plj})/b_{cj}, & \overline{a}_{plj} < b_{cj}, \\ 0, & \underline{a}_{plj} \le b_{cj} \le \overline{a}_{plj}, \\ (\underline{a}_{plj} - b_{cj})/a_{plj}, & \underline{a}_{plj} > b_{cj} \end{cases} \qquad (13)$$

Для случая, когда отсутствуют параметры, необходимые для регистрации соответствующих характеристик задач, $S(b_{tqj}, a_{plj}) = 1$.

При этом должно выполняться соотношение

$$\sum_{j=1}^{m(pl)} \rho(a_{plj}, A_{pl}) = 1, \; j = 1, ..., m_{pl}.$$

Эффективность c-го эквивалентного АК ($B_c^э$) при выполнении подпрограммы Mp вычисляется с помощью функции принадлежности такого вида:

$$F_2(B_c^э, M_p) = \sum_{l=1}^{k(p)} \rho(A_{pl}, M_p) F_1(B_c, A_{pl}), \qquad (14)$$

$$p = 1, ..., h,$$

где $\rho(Ail, Mi)$ — весовой коэффициент важности задачи A_{il} для подпрограммы M_p; при этом должно выполняться соотношение

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 76—83

$$\sum_{l=1}^{k(p)} \rho(A_{pl}, M_p) = 1.$$

Эффективность c-го эквивалентного АК ($B_c^э$) АК при выполнении научно-прикладной программы в целом (M) определяется с помощью функции принадлежности такого вида:

$$F_3(B_c^э, M) = \sum_{p=1}^{h} \rho(M_p, M) F_2(B_c, M_p); \qquad (15)$$

где $\rho(Mp, M)$ — весовой коэффициент важности подпрограммы Mp для программы M, при этом должно выполняться соотношение

$$\sum_{p=1}^{h} \rho(M_p, M) = 1.$$

Выполнив вычисления F_3 для всех эквивалентных АК по максимальному значению функции принадлежности (15) определяется квазиоптимальный состав АК как наиболее эффективный для решения всего множества задач научно-прикладной программы ДЗЗ. Выбранный вариант состава АК является решением поставленной задачи.

1. Волкович В. Л., Волошин А. Ф., Даргейко Л. Ф. и др. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных систем управления. — Киев: Наук. думка, 1984.—216 с.
2. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.—254 с.
3. Федоровский А. Д. Системный подход при проектировании сложной оптической аппаратуры // Оптико-мех. промышленность.—1980.—№ 3.—С. 36—38.
4. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Об оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Доп. НАНУ.—2001.—№ 10.—С. 120—124.

Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, С. А. Рябоконенко, И. П. Пахомов, К. Ю. Суханов

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

При проведении различных мероприятий, связанных с сельским, лесным и водным хозяйствами, решением задач городского и промышленного строительства, обычно выполняется геофизическое районирование территорий с использованием аэрокосмической информации. С этой целью по космическим снимкам (КС) проводится дешифрирование и последующая классификация расположенных на территории ландшафтных комплексов (ЛК) как по оптическим спектральным признакам, так и по структурно-текстурным характеристикам.

Известны работы по исследованию структурных (форма, размер, относительное положение и ориентация элементов ЛК) и текстурных (внутреннее строение элементов ЛК) признаков природных объектов, которые проводились на основе оптического когерентного спектрального анализа. Так, например, в работе [6] рассматривается структурно-зональный анализ (СЗА) как метод дешифрирования на космических снимках изображений геологических и других объектов. Идея СЗА состоит в оптическом преобразовании фотоснимков и получении количественной оценки ПЧС путем оптической фильтрации наиболее информативных признаков, характеризующих пространственную структуру изображения.

В настоящее время ИСЗ оснащены оптической сканирующей аппаратурой высокого разрешения, позволяющей получать изображения в цифровой форме. В связи с этим для исследований оптической пространственной структуры и текстуры изображений в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины вместо оптического когерентного спектрального анализа был применен цифровой метод, позволяющий, используя возможности современных ЭВМ, значительно ускорить и автоматизировать процесс дешифрирования КС. При этом стало возможным не только снизить материальные и временные затраты, но и создавать компьютерные хранилища геоинформации для их последующего использования.

Цель данной работы показать возможности структурно-текстурного анализа при дешифрирова-

© А. Д. ФЕДОРОВСКИЙ, В. Г. ЯКИМЧУК, С. А. РЯБОКОНЕНКО, И. П. ПАХОМОВ, К. Ю. СУХАНОВ, 2002

нии КС и анализе космических изображений ЛК. Предложенные в данной статье методы могут быть положены в основу разработки новых компьютерных программ дешифрирования КС и классификации ЛК по типам для решения различных задач землепользования.

Структура и текстура изображений элементов ЛК является одним из определяющих информативных признаков при классификации последних по типам. Несмотря на изменчивость тона космического изображения, обусловленную сменой сезонных и погодных состояний ландшафта, структурно-текстурные особенности рисунка сравнительно долгое время могут сохраняться, отражая горизонтальную внутриландшафтную дифференциацию природных элементов. Текстуре ландшафтов, изучаемых по снимкам из космоса, можно дать не только качественную, но и количественную оценку. С этой целью используются разнообразные математико-статистические методы, предложенные в работах [1, 2]. Ландшафтная индикация позволит разработать новые дешифровочные показатели, использование которых перспективно в свете поиска путей автоматизации дешифрирования ландшафтной информации на КС.

ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛК НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

Известно, что одним из информативных признаков структурно-текстурных параметров изображений ЛК является их пространственно-частотный спектр (ПЧС) [6]. Изменению яркости и координат точек в плоскости предмета или его изображения в терминах спектрального анализа соответствует изменение амплитуды и фазы по пространственным частотам. Таким образом, изображению ЛК, имеющему определенную структуру, соответствует ПЧС, характеризующийся суммой пространственных составляющих (гармоник) с соответствующими амплитудами и фазовыми сдвигами между этими составляющими. Значения амплитуд определяют вклад соответствующих пространственных частот в формирование изображения, а значения фазовых сдвигов определяют изменение координат отдельных точек в изображении относительно их положения в объекте. Неискаженному изображению соответствует область пространственных частот, в пределах которой характеристика фазового ПЧС равна нулю, т. е. в изображении сохраняются первоначальные координаты различных точек объекта. В качестве ПЧС наиболее часто используются двумерные спектры Фурье. Составляющие ПЧС — $C(n, m)$ вычисляются по методу дискретного двумерного преобразования Фурье в соответствии с выражением [3]:

$$C(n, m) = \frac{1}{A \cdot B} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} L(x, y) \cdot \exp\left[-\left(\frac{nx}{A}\right) + \left(\frac{my}{B}\right) \right], \quad (1)$$

где n, m — номера пространственных гармоник по осям X, Y; x, y — номера пикселов в пределах выделенного фрагмента по осям X, Y; $L(x, y)$ — распределение яркости в изображении; A, B — количество отсчетов по осям X, Y.

Разработанная в Центре аэрокосмических исследований Земли (ЦАКИЗ) ИГН НАН Украины программа позволяет на основе вычисления ПЧС изображений ЛК определять преимущественное направление развития протяженных структур. Необходимость последнего возникает при исследовании по космическим снимкам рельефа местности, выделении линеаментов геологических структур, определении преимущественного направления водных потоков, расположения лесопосадок и др. Так, если в исходном изображении имеются протяженные структуры разного направления, то будет наблюдаться расширение ПЧС в направлении, перпендикулярном к наибольшей их протяженности. Изме-

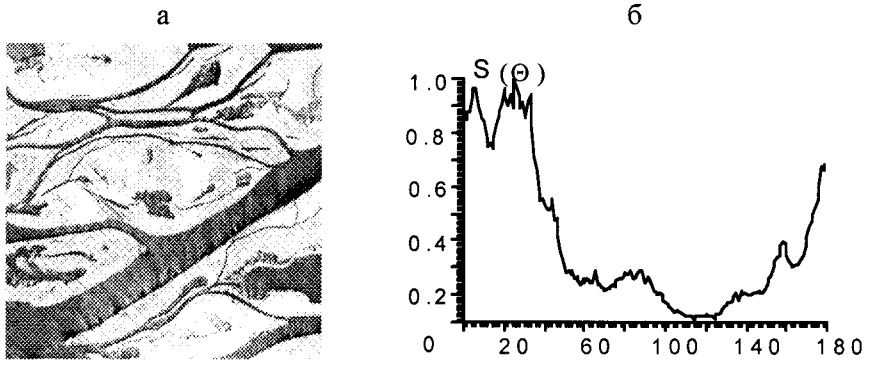


Рис. 1. Определение преимущественного направления водных потоков: *а* — фрагмент космического снимка участка устья реки Днепр, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения

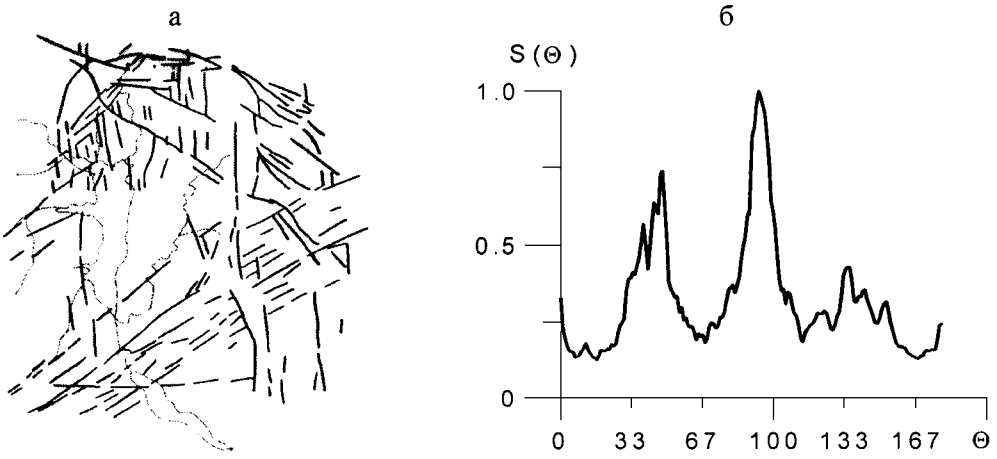


Рис. 2. Распределение энергии пространственного спектра по углам Θ: *а* — фрагмент космического снимка участка устья реки Днепр, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения

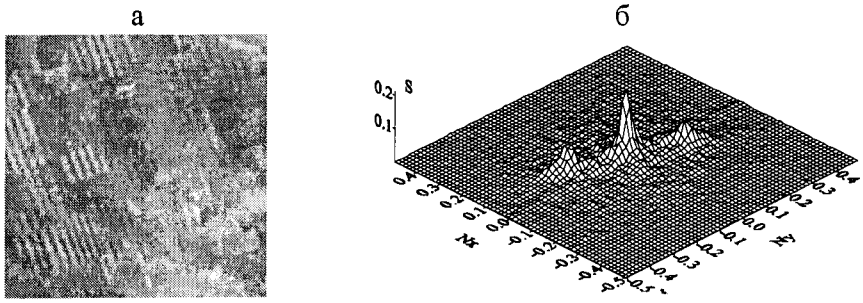


Рис. 3. Двумерные спектры Фурье для участка лесопосадки: *а* — авиаснимок, *б* — амплитудные спектры. *S* — амплитудный спектр Фурье, N_x и N_y — пространственные частоты по осям *X* и *Y*

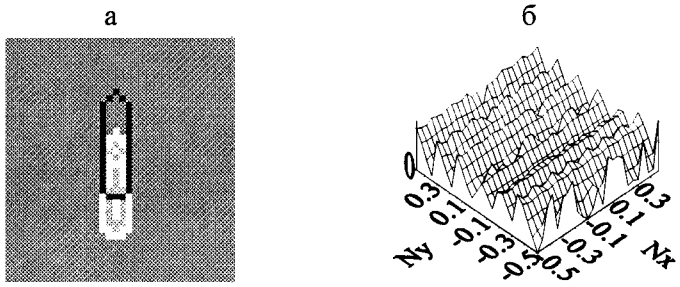


Рис. 4. К определению расстояния между двумя положениями объекта: *а* — изображение двух положений объектов, *б* — разности фазовых спектров

ряя распределение интенсивности спектра по угловой координате, можно определить доминирующие направления и соотношение их суммарной протяженности. В этом случае для амплитудного спектра, преобразованного в полярные координаты, определяется функция распределения амплитудной составляющей по направлениям. Угол, соответствующий направлению с максимальным значением амплитудной составляющей, указывает доминирующее направление протяженной структуры.

Предлагаемый подход был апробирован при анализе доминирующих направлений рукавов устьев рек, геологических разломных структур и лесопосадок. На рис. 1, *а* изображен космический снимок участка устья Днепра, а на рис. 1, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения. При сопоставлении графика с изображением можно отметить, что направлению основного русла соответствует пик ПЧС под углом примерно 30°, причем энергетически достаточно насыщенный, что

указывает на преобладание более низких частот. Множеству мелких рукавов и протоков, направление которых совпадает с направлением оси абсцисс, соответствуют участки спектра в области углов 10° и 180°. Пики ПЧС, расположенные под углом 90° и 160°, соответствуют локальным линейным объектам, не совпадающим с направлением русла реки. График углового распределения ПЧС фрагмента изображения (рис. 1, *б*) построен в условных координатах, однако пересчет их в географические координаты для привязки к местности трудностей не представляет.

На рис. 2, *а* приведены результаты дешифрирования космического снимка участка земной поверхности в зоне разломных образований. Известно, что определение путем непосредственных измерений направлений линеаментов и соотношений их интенсивностей является достаточно трудоемким процессом. Эта задача значительно упрощается в результате использования компьютерной обработки ПЧС линеаментов на основе метода пространственно ориентированной фильтрации. На рис. 2, *б* изображено распределение амплитуд ПЧС в функции угловой ориентации фильтра. Кроме непосредственного определения направления линеаментов возможно измерение соотношений линеаментов по различным направлениям путем подсчета числа ординат, взятых с определенным шагом в локальных зонах.

Эффективность пространственного спектрального анализа возрастает при наличии в анализируемом изображении периодически расположенных структур (лесопосадок, сельхозкультур и др.), а также с повышением разрешающей способности космических снимков.

В качестве примера на рис. 3 изображен фрагмент авиаснимка с лесопосадками с пространственным разрешением 1 м, и его пространственный спектр. Несмотря на невысокий контраст изображения (рис. 3, *а*), спектральное распределение яркости (рис. 3, *б*) достаточно наглядно указывает на наличие в изображении периодической структуры, причем по форме гистограммы можно установить наличие периодичности, а по расстоянию между максимумами и минимумами — интервал повторения одинаковых структур в единицах длины.

Фазовые ПЧС нами использовались для автоматического определения величины смещения объекта. Задача решается путем сравнения фазовых ПЧС, полученных при начальном и конечном положениях объекта. На рис. 4 приведен пример использования фазовых ПЧС для вычисления по снимку расстояния, на которое переместился объект. Смещению изображения объекта (рис. 4, *а*) на определенное количество пикселов соответствует такое же число периодов разности фазовых составляющих спектра, а точность измерения координат соответствует одному пикселю изображения. Приведенный на рис. 4, *б* график зависимости разности фазовых составляющих ПЧС двух изображений содержит шесть периодов изменения фазы. Метод измерения смещений с помощью фазового ПЧС может быть применен при автоматическом анализе разновременных космических снимков, например для оценки изменений береговой линии, образования мелководий и островов в руслах рек, контроля лесопосадок и посевов сельхозкультур и др.

ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛК НА ОСНОВЕ МАРКОВСКИХ СВОЙСТВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для космических изображений таких составляющих ландшафтных комплексов, как лесная и сельскохозяйственная растительность, водная поверхность, городская застройка [1] функции автокорреляции имеют вид убывающих зависимостей, которые аппроксимируются экспоненциальными функциями с показателями степени в диапазоне −0.2, ..., −0.7. Поэтому при описании структурно-текстурных характеристик изображений ЛК вероятностную зависимость значений яркости пикселов космического снимка можно представить в виде марковской модели [7, 8]. В соответствии с определением марковских процессов, плотность вероятности значений яркости пиксела изображения с координатами x и y как элемента m-связного марковского поля зависит только от яркости тех пикселов дискретизированного изображения, расстояние до которых не превышает m. В случае минимальной окрестности m, равной удалению на один пиксел, имеем окрестность, состоящую из четырех пикселов с координатами $(x - 1, y)$, $(x + 1, y)$, $(x, y - 1)$ и $(x, y + 1)$. Этот случай является наиболее простым, так как его можно свести к простой (односвязной) и одномерной марковской цепи путем усреднения вероятностей по двум осям. При расстоянии, равном значению $m = \sqrt{2}$ пикселов к окрестности размера $m = 1$ добавляются еще пикселы с координатами $(x - 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$, $(x + 1, y\, y - 1)$ и $(x + 1, y + 1)$, и окрестность состоит из восьми пикселов. При расстоянии $m = 2\sqrt{2}$ пикселов окрестность состоит из 16 пикселов, которые обрамляют снаружи окрестность из восьми пикселов.

Было проведено исследование возможности использовать марковские свойства изображений с перспективой автоматизации процесса дешифрирования изображений элементов ЛК на КС.

Вероятностную зависимость значений яркости пикселей КС можно представить в виде марковских моделей [8], при построении которых могут быть использованы различные подходы. Например, та-

кие как цепи Маркова простые и сложные, а также вероятностная взаимосвязь изображений в различных спектральных слоях.

В случае простых марковских цепей, когда пиксел с координатами x, y имеет яркость L_1, а его окрестность размером $m = \sqrt{2}$, состоящая из восьми близлежащих пикселов, имеет среднее значение яркости L_2, то математической формой описания двухмерной марковской модели изображения является матрица переходных вероятностей значений яркости L_1 и L_2, которую также называют матрицей смежных вероятностей (МСВ).

Учитывая, что яркость изображения обычно передается восьми разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ имеет размер 256^2 элементов. Элемент P_{12} матрицы является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселов, имеющих значения оптической яркости L_1 и L_2. Величина P_{12} определяется как отношение количества пар смежных пикселов, имеющих яркости L_1 и L_2, к общему числу различных сочетаний значений яркости в анализируемом изображении ЛК.

МСВ служат основой для вычисления структурных признаков ЛК. Известные методы оценки пространственной структуры изображений на основе статистических характеристик МСВ заключаются в вычислении совокупности параметров Харалика [7] или значений взаимной корреляционной функции для МСВ исследуемого и эталонного объекта.

С целью сокращения вычислительных операций нами после анализа МСВ изображений ЛК была выполнена замена вероятностей значений яркости смежных пикселей на вероятности абсолютных значений разностей их яркостей (контрастов) [4], которые обозначаются Δ. В итоге были получены для простой цепи Маркова матрицы вероятностей контрастов (ПМВК) яркости

$$p(\Delta),\ \Delta = 0, ..., 2^N - 1, \qquad (2)$$

где $2^N \times 1$ — размерность этих матриц, N — разрядность цифрового снимка. Элемент МВК $p(\Delta)$ является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселей, контраст яркостей которых Δ. Величина $p(\Delta)$ определяется как отношение количества пар смежных пикселей, имеющих яркости L_1 и $L_1 \pm \Delta$, к общему числу различных контрастов значений яркости в анализируемом изображении ЛК. Результаты применения матрицы вероятностей контрастов простых цепей Маркова при дешифрировании КС некоторых ландшафтных зон были описаны в работе [5]. В данной работе рассматривается возможность применения марковской модели при дешифрировании многозональных КС в случае окрестности $m_1 = 2\sqrt{2}$, т. е. в каждом слое добавляется еще 16 пикселей, обрамляющих окрестность $m = \sqrt{2}$.

Математической формой описания двухмерной марковской модели изображения является матрица переходных вероятностей значений яркости L_1, L_2 и L_3 соседних пикселей КС. При этом пиксель с координатами x, y имеет яркость L_1, значение L_2 является средним значением яркости пикселей из окрестности $m = \sqrt{2}$, а значение L_3 — средним значением яркости пикселей из окрестности $m = 2\sqrt{2}$, которая образована из $m_1 = 2\sqrt{2}$, исключая $m = \sqrt{2}$. Учитывая, что яркость изображения обычно передается восьми разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ имеет размер 256^3 элементов. Элемент P_{123} матрицы является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселей, имеющих значения оптической яркости L_1, L_2 (окрестность размера $m = \sqrt{2}$) и L_3 (окрестность $m = 2\sqrt{2}$). Величина P_{123} определяется как отношение количества смежных пикселей, имеющих яркости L_1, L_2 и L_3, к общему числу различных сочетаний значений яркости в анализируемом изображении ЛК.

Аналогично модели ЛК как простых марковских цепей была выполнена замена вероятностей значений яркости смежных пикселей на вероятности разностей их яркостей (контрастов). Обозначение контрастов: Δ_1 — абсолютное значение перепада яркости между центральным пикселем и средним значением окрестности $m = \sqrt{2}$, Δ_2 — абсолютное значение перепада яркости между центральным пикселом и средним значением окрестности $m = 2\sqrt{2}$.

В итоге для сложной цепи Маркова были получены матрицы вероятностей контрастов (СМВК) яркости

$$p(\Delta_1, \Delta_2), \qquad \Delta_1, \Delta_2 = 0, ..., 2^N - 1, \qquad (3)$$

где $2^N \times 1$ — размера этих матриц, N — разрядность цифрового снимка. Элемент МВК 2-сложных цепей Маркова $p(\Delta_1, \Delta_2)$ является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселов, контраст яркостей которых равна Δ. Величина $p(\Delta_1, \Delta_2)$ определяется как отношение суммы количества пар смежных пикселей в окрестности $m = \sqrt{2}$, имеющих яркости L_1, $L_1 \pm \Delta_1$ и количества пар смежных пикселов в окрестности $m = 2\sqrt{2}$, имеющих яркости L_1, $L_1 \pm \Delta_2$, к общему числу различных контрастов значений яркости в анализируемом изображении ЛК.

Отражательная способность различных элементов ЛК в разных спектральных слоях КС неодинакова и зависит от ряда факторов. Например, влияние растительности на отражательную способность в трех слоях КС (1: 500—590 нм, 2: 610—680 нм,

Таблица 1. Коэффициент корреляции яркостей трех слоев снимка

Спектр. слои	Коэффициент корреляции	
	Городская застройка	Лес
1—2	0.99	0.77
1—3	0.80	0.46
2—3	0.73	0.03

3: 790—890 нм) иллюстрируется степенью коррелированности яркостей слоев снимка (таблица 1). Так, для городской застройки с молодыми насаждениями слои снимка более коррелированны, чем для леса, наиболее сильная корреляция наблюдается между слоями 2 и 3.

Указанные свойства можно учесть в модели вероятностной взаимосвязи спектральных слоев КС, на основе которой текстуру многослойного изображения можно рассматривать как множество пикселов, у которых зависимость между значениями яркости одного слоя распространяется на пикселы другого слоя, а характер этой зависимости является элементом представления текстуры изображения. Математической формой описания модели многослойного изображения может быть распределение значений разностей яркости разных слоев КС.

Для сравнительной оценки моделей ЛК был проведен эксперимент, в ходе которого были обработаны снимки Житомирской области (рис. 5) («Spot», 29.04.1995). На снимках были выделены и проанализированы такие ЛК, как участки леса (Л), городской застройки (Г) и сельскохозяйственных угодий (С). Размеры участков 32×32 пкл. Для этих участков были построены марковские модели в виде усредненных ПМВК, СМВК и МВОС (для удобства элементы матриц представлены в процентах, и сумма всех элементов матрицы равна 100) и вычислены разности элементов усредненных матриц для различных пар ЛК (Л и Г, Л и С, Г и С) по трем слоям КС (1, 2, 3).

Ниже приведены таблицы и графики разностей усредненных матриц: разности ПМВК — на рис. 6, а, разности СМВК — на рис. 6, б.

ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛК НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Рассматривается возможность исследования пространственно-неоднородных структур ЛК методами фрактальной геометрии. Понятие фрактала (изломанный объект с дробной размерностью) и его приложение к описанию форм различных объектов дает возможность построить модели широкого класса нетривиальных случайных структур.

Рис. 5. Фрагмент космического снимка Житомирской области (ИСЗ «Spot»): участок леса — 1, участок, содержащий сельхозугодья — 2, городская застройка — 3

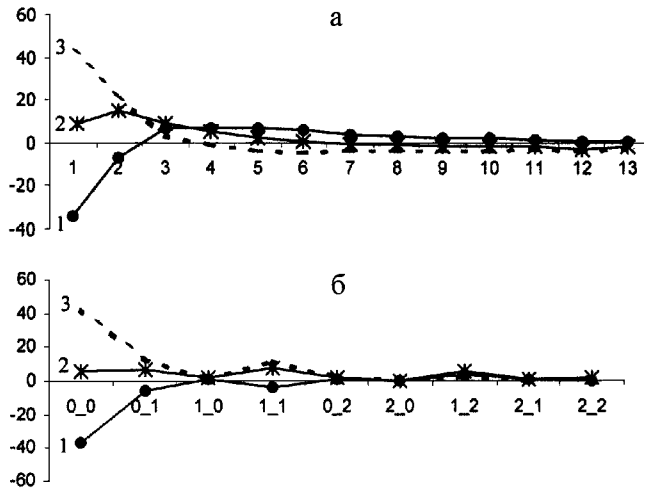


Рис. 6. Графики разностей ПМВК (а) и СМВК (б) всех комбинаций ЛК для спектрального слоя 3. Обозначения: 1 — "С-Л", 2 — "С-Г", 3 — "Л-Г"

На основе понятия фрактала (изломанный объект с дробной размерностью) и его приложения к описанию различных объектов рассмотрим возможность построения моделей классов случайных структур ЛК. В качестве объекта фрактального описания берется квадратный участок снимка $a \times a$ пикселов, который преобразуется в двумерный массив яркостей. Для этого массива производится построение фрактального образа трехмерного объекта в соответствии с выражениями (4) в виде параметров фрактального преобразования F_{ij}, $i = 0, ..., m$, $j = 1, ..., N_1$, где i — порядковый номер ПФП, j —

номер значения параметра, $m = (a-1)^2$, a_{ij}^{p}, d_{ij}^{p}, k_{ij}^{p}, l_{ij}^{p}, m_{ij}^{p}, e_{ij}^{p}, f_{ij}^{p}, g_{ij}^{p}. Значения ПФП предлагается использовать в качестве модели изображений ЛК.

$$a_{ij}^{u} = \frac{x_{i+1} - x_i}{x_n - x_0}, \qquad d_{ij}^{u} = \frac{y_{j+1} - y_j}{y_m - y_0},$$

$$k_{ij}^{u} = \frac{F_{i+1j} - F_{ij}}{x_n - x_0} - m_{ij}^{u}\frac{F_{n0} - F_{00}}{x_n - x_0},$$

$$l_{ij}^{u} = \frac{F_{ij+1} - F_{ij}}{y_m - y_0} - m_{ij}^{u}\frac{F_{0n} - F_{00}}{y_m - y_0},$$

$$m_{ij}^{u} = \left[F_{ij} + x_0\frac{F_{n0} - F_{00}}{x_n - x_0} + y_0\frac{F_{0n} - F_{00}}{y_m - y_0}\right], \qquad (4)$$

$$e_{ij}^{u} = x_i\frac{x_n}{x_n - x_0} - x_{i+1}\frac{x_n}{x_n - x_0},$$

$$f_{ij}^{u} = y_j\frac{y_m}{y_m - y_0} - y_{j+1}\frac{y_m}{y_m - y_0},$$

$$g_{ij}^{u} = F_i j - y_0\frac{F_{ij+1} - F_{ij}}{y_m - y_0} - x_0\frac{F_{i+1j} - F_{ij}}{x_n - x_0}.$$

Проверка возможности дешифрирования ЛК производилась экспериментальным путем. Для проведения эксперимента было разработано программное обеспечение, позволяющее работать с космическими снимками, получать из выбранных на снимке окон анализа яркости пикселов изображения, выполнять для них фрактальные преобразования, а также выполнять обработку и сравнение фрактальных моделей для разных ЛК.

Качество модели ЛК для задачи дешифрирования зависит от размера участка анализа в пределах исследуемого ЛК, но с увеличением участка возрастают требования к вычислительным ресурсам. Определение оптимального значения a производилось путем последовательного увеличения участка анализа. На космическом снимке выбирались квадратные участки анализа размера 4×4, 6×6 и 8×8 пикселов пределах анализируемых ЛК. По участкам определялись эталонные усредненные ПФП T_{ij}^{l}. Отдельные участки использовались для создания контрольных ПФП T_{ij}^{k} (l, k = 1, 2, ..., и являются номерами ЛК). Оценка параметров фрактальных моделей производилось на основе разностей значений параметров отдельных контрольных участков и усредненных эталонных значений в соответствии с выражением

$$\Sigma_i^{kl} = \sum_{j=0}^{m-1}(T_{ij}^{k} - \overline{T}_{ij}^{l})^2 \qquad (5)$$

и фрактальной модели в целом

$$\Sigma^{kl} = \sum_{i=1}^{N_1}\Sigma_i^{kl}. \qquad (6)$$

В качестве критерия оценки фрактальной модели для дешифрирования ЛК использовалось отношение значений (6), вычисленных для контрольного участка, не принадлежащего эталонному ЛК Σ^{kl}, но принадлежащего Σ^{ll}:

$$\mu^{kl} = \Sigma^{kl}/\Sigma^{ll}. \qquad (7)$$

Если $\mu^{kl} \geq M^{kl}\mu^{ll}$ для l,k = 1, 2, ..., (M^{kl} — пороговые значения, определяемые в процессе набора статистики по КС), то ПФП могут быть использованы для дешифрирования ЛК, а если $\mu^{kl} < M^{kl}\mu^{ll}$, то дешифрирование ЛК невозможно. С использованием критерия (7) в результате проведенного эксперимента было выбрано оптимальное в рамках обработанных КС значение стороны квадрата анализа a = 8. Некоторые результаты эксперимента по космическому снимку КС Житомирской области, сделанному с помощью спутника «Spot»

Таблица 2. Результаты сравнения контрольных участков с эталоном леса

Параметр	i	λλ = 500—590 нм			λλ = 610—680 нм			λλ = 790—890 нм		
		Σ_i^{11}	Σ_i^{21}	Σ_i^{31}	Σ_i^{11}	Σ_i^{21}	Σ_i^{31}	Σ_i^{11}	Σ_i^{21}	Σ_i^{31}
k_{ij}^{l}	1	6.0E+00	1.3E+02	1.6E+03	1.2E+01	7.5E+01	2.0E+03	1.6E+01	3.2E+02	5.2E+02
l_{ij}^{l}	2	5.6E+00	1.4E+02	1.3E+02	6.7E+00	1.1E+02	1.7E+02	3.8E+01	2.2E+02	2.2E+02
m_{ij}^{l}	3	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06	6.2E+00	6.6E+00	7.0E+00	5.1E+00	7.4E+00	4.5E+00
e_{ij}^{l}	4	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06
f_{ij}^{l}	5	2.0E+04	3.1E+06	1.1E+06	2.0E+04	3.1E+06	1.1E+06	2.0E+04	3.1E+06	1.1E+06
g_{ij}^{l}	6	1.4E+08	4.2E+09	8.5E+09	2.2E+08	2.7E+09	1.1E+10	6.0E+08	8.1E+09	5.9E+09
k_{ij}^{u}	7	1.0E+00	5.4E+01	1.9E+03	1.6E+00	1.8E+02	2.3E+03	2.1E+00	3.6E+01	7.9E+02
l_{ij}^{u}	8	1.1E+00	6.0E+01	1.3E+02	3.8E+00	2.2E+02	1.3E+02	4.5E+00	1.2E+01	3.9E+02
m_{ij}^{u}	9	6.0E+00	6.2E+00	7.9E+00	5.9E+00	6.0E+00	6.0E+00	4.9E+00	4.7E+00	3.7E+00
e_{ij}^{u}	10	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06	2.8E+04	3.0E+06	3.8E+06
f_{ij}^{u}	11	2.0E+04	3.1E+06	1.1E+06	2.0E+04	3.1E+06	1.1E+06	2.0E+04	3.1E+06	1.1E+06
g_{ij}^{u}	12	2.1E+07	1.3E+09	1.1E+10	5.1E+07	4.7E+09	1.1E+10	2.5E+07	4.0E+08	9.9E+09

Таблица 3. Значения μ^{kl}

Слой	μ^{21}	μ^{31}
1	2.5	3.2
2	1.8	2.3
3	1.7	2.0

30.04.1995 в диапазонах 1—3 (500—590 нм, 610—680 нм, 790—890 нм) приведены ниже. На снимке для эксперимента были выбраны три ЛК: лес, сельхозугодья и городская застройка и вычислены эталонные ПФП: для леса T^1_{ij}, для сельхозугодий T^2_{ij} и для городской застройки T^3_{ij} (i = 0, ..., N, j = 0, ..., m; N = 12, m = 48). Затем вычислялись ПФП для контрольных участков T^1_{ij}, T^2_{ij}, T^3_{ij} и на основании полученных данных определялись Σ^{kl} в соответствии с (5). Для трех слоев КС в табл. 2 приведены значения Σ^{11}_i, Σ^{21}_i и Σ^{31}_i, вычисленные в соответствии с выражением (5) для информативных ПФП. В табл. 3 приведены значения μ^{kl}, вычисленные в соответствии с (7).

Данные табл. 2 показывают, что из трех слоев снимка суммы Σ^{11}_i для контрольного участка и эталонных значений леса значительно меньше сумм Σ^{21}_i для контрольного участка сельхозугодий и эталонных значений леса, а также сумм Σ^{31}_i для городской застройки и эталонных значений леса. Последнее показывает целесообразность использования параметров фрактального преобразования для дешифрирования ЛК.

Ограниченный объем статьи не позволяет проанализировать все возможные методы дешифрирования космических изображений ЛК по структурно-текстурным признакам. В частности, возросшие за последнее время возможности вычислительной техники дали мощный толчок развитию и использованию при дешифрировании КС методов на основе нейронных сетей. Не рассмотрены вопросы фильтрации как способа предварительного преобразования изображения с целью выделения или усиления структурно-текстурных информативных признаков.

Изложенные методы будут обобщены и использованы как основа для создания многофункциональной компьютерной программы дешифрирования ЛК на КС по структурно-текстурным признакам.

1. Викторов А. С. Рисунок ландшафта. — М.: Мысль, 1986.— 180 с.
2. Николаев В. А. Проблемы регионального ландшафтоведения. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979.— 160 с.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М., 1978.—848 с.
4. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Новиков и др. Дешифрирование космических снимков: распознавание ландшафтных зон на основе структурного анализа // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 39—45.
5. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Рябоконенко С. А. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов с использованием марковской модели изображений // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 80—84.
6. Янутш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М: Недра. 1991.—240 с.
7. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE.—1979.—67, N 5.—P. 786.
8. Rabiner L. R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition // Proc. IEEE.—1989.—77, N 2.—P. 257—285.

Имитационное моделирование космических исследований ДЗЗ: постановка задачи и пути решения

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Проведение космических исследований по научно-прикладной программе ДЗЗ занимает продолжительное время и связано со значительными материальными затратами. Поэтому важно иметь возможность предварительно и в процессе проведения космических исследований — космического эксперимента (КЭ) ДЗЗ проводить имитационное моделирование процесса функционирования всей системы ДЗЗ.

Имитационное моделирование КЭ будем рассматривать как методологию прогнозирования сценариев развития системы ДЗЗ с учетом взаимодействия

© А. Д. ФЕДОРОВСКИЙ, В. Г. ЯКИМЧУК, 2002

всех уровней составляющих систему: тематических задач ДЗЗ, орбитальных параметров космического аппарата, состава бортового приборного комплекса, каналов связи и наземной инфраструктуры.

Задача состоит в разработке имитационной модели КЭ в системе ДЗЗ на основе системного подхода [2]. Последний является одним из способов определения количественных и качественных характеристик системы ДЗЗ (эффективности существующих и перспективных КА, качества решения тематических задач), принятия рациональных решений по эксплуатации и развитию системы ДЗЗ, коррекции ошибок управления.

Стратегия применения космических средств зондирования связана с решением конкретных научных и народнохозяйственных задач, определяется динамикой процессов, происходящих на земной поверхности и в околоземном пространстве. Эти процессы и задачи носят либо пространственно локальный характер (например, поиск полезных ископаемых, прокладка железнодорожных магистралей, провод судов в сложной ледовой обстановке, обследование определенных районов для размещения экологически нечистых производств), либо глобальный (зондирование воздушного бассейна и прогноз погоды, решение задачи землепользования и картографирования, контроль зарождения пожаров и цунами, исследования состояния лесных массивов и сельскохозяйственных угодий, прибрежного шельфа, загрязнения океанских просторов и воздушного бассейна). Значительная временная неоднородность протекания наблюдаемых с помощью ДЗЗ процессов позволяет говорить о плановом (исследование месторождений полезных ископаемых, картографирование); периодическом (метеослужба и прогноз погоды) и оперативном (стихийные бедствия, землетрясения, наводнения) типах зондирования. При этом должны учитываться такие требования к системе ДЗЗ, как:

— соответствие параметров аппаратуры информационным признакам (характеристикам) тематических задач,
— покрытие районов зондирования,
— совместимость работы аппаратуры,
— возможность отказов и ресурс аппаратуры,
— пропускная способность каналов радиосвязи,
— размещение наземных зон приема информации,
— оптимизация продолжительности маршрутов,
— рациональное распределение ресурсов и др.

Имитационная модель должна позволить оптимизировать систему ДЗЗ по критериям информативности, производительности и оперативности. В модели должна быть обеспечена возможность для выполнения многократных < прогонов >, для исследования различных сценариев и возможных ситуаций и сбора статистических данных.

Для построения динамических моделей управляемых систем широко используется метод системной динамики, в котором управление процессом получения информации заключает в себе несколько этапов [3, 5]. Наиболее важными среди них следует считать прогноз возможных сценариев развития, принятие решения о выборе одного из возможных сценариев и выполнение операций, необходимых для осуществления выбранного сценария. Информация о том, насколько планируемый сценарий процесса отличается от фактического, позволяет вводить поправки не только в систему управления, но и пересматривать установленные ранее цели с точки зрения их практической реализуемости. В методе системной динамики при моделировании сложного комплекса выполнения задач ДЗЗ система рассматривается как конкретный объем сведений (информации) относительно той проблемы, для решения которой вводится данная система. В качестве исходной информации для выбора параметров, характеризующих движение к поставленным целям, будем использовать целевые установки функционирования. Цели функционирования через выбранный для их представления вектор состояния определяют основной набор элементов, из которых должна быть составлена система. Структура системы формируется соединением элементов путем использования информации о связях между ними. Элементы, которые не входят в вектор состояния, позволяют более детально представить связи системы с «внешним миром». Граница системы проходит там, где появляются такие связи, которые воздействуют на элементы системы, не встречая ответной реакции со стороны самой системы. Внешнее воздействие на внутренний элемент передается другим элементам системы и формирует сценарий ее развития.

Назовем основные концепции системного анализа, которые позволят построить информационную технологию управляемого развития [1]. Относительность целей состоит в том, что целевые установки неизбежно претерпевают изменения в процессе управления развитием и требуют постоянной адаптации. Целостность управляемой системы заключается в том, что ее вектор состояния должен содержать минимальный набор параметров, необходимых для контроля движения к целям. Причинность говорит о том, что всякое изменение состояния системы, должно рассматриваться как следствие некоторого влияния на систему. Подчиненность свидетельствует об иерархическом построении управляемых систем. Динамический баланс постулирует устойчивость управляемых систем, при наличии внешнего воздействия на систему не происходит ее разрушения. Информационное единство

предполагает, что для управления должна быть использована вся доступная информация о состоянии системы, усвоение системой информации, полученной в наблюдениях, позволяет адаптировать к реальности выбранный сценарий и целевые установки.

Наиболее распространены три способа описания управляемых систем: словесный (вербальный), концептуальный (графический, в виде диаграммы) и формальный (в виде уравнений и формул). Каждое из этих описаний дает соответствующую модель системы. Возможные сценарии развития способна обеспечить только формальная модель с динамическими уравнениями, созданию которой предшествует построение ее концептуальной модели. Концептуальная модель разрабатывается на основе вербального описания проблемы устойчивого развития и целевых установок. Поэтому процесс получения возможных сценариев развития состоит из последовательного использования всех трех форм описания управляемой системы.

Метод системной динамики имеет свои ограничения, состоящие в отсутствии алгоритмов нахождения функций, определяющих связи между элементами системы, а также отсутствии адаптации моделей к статистике отклонений модельных сценариев от фактических. Метод, который использует основные преимущества метода системной динамики и учитывает возможности адаптации сценариев развития к наблюдениям, называется «адаптивный баланс влияний». Название подчеркивает решающую роль адаптации к наблюдениям как модели управляемой системы, так и целевых установок развития. Английский вариант названия метода Adaptive Balance of Causes (ABC) [1].

Суть ABC-метода заключается в следующем. Предположим, что управляемая система состоит из универсальных модулей, каждый из которых находится в состоянии динамического равновесия. Равновесие поддерживается функциями влияния, связывающими данный модуль с другими модулями системы. Внутри системы сохраняется режим динамического баланса влияний, под управлением внешнего воздействия на систему.

ABC-метод позволяет моделировать решение практических задач управления устойчивым развитием сложных систем путем следующих операций:

— создания унифицированного модуля из элементов управляемой системы, которые являются параметрами ее вектора состояния,

— определения взаимных влияний модулей для объединения их в структуру концептуальной модели системы,

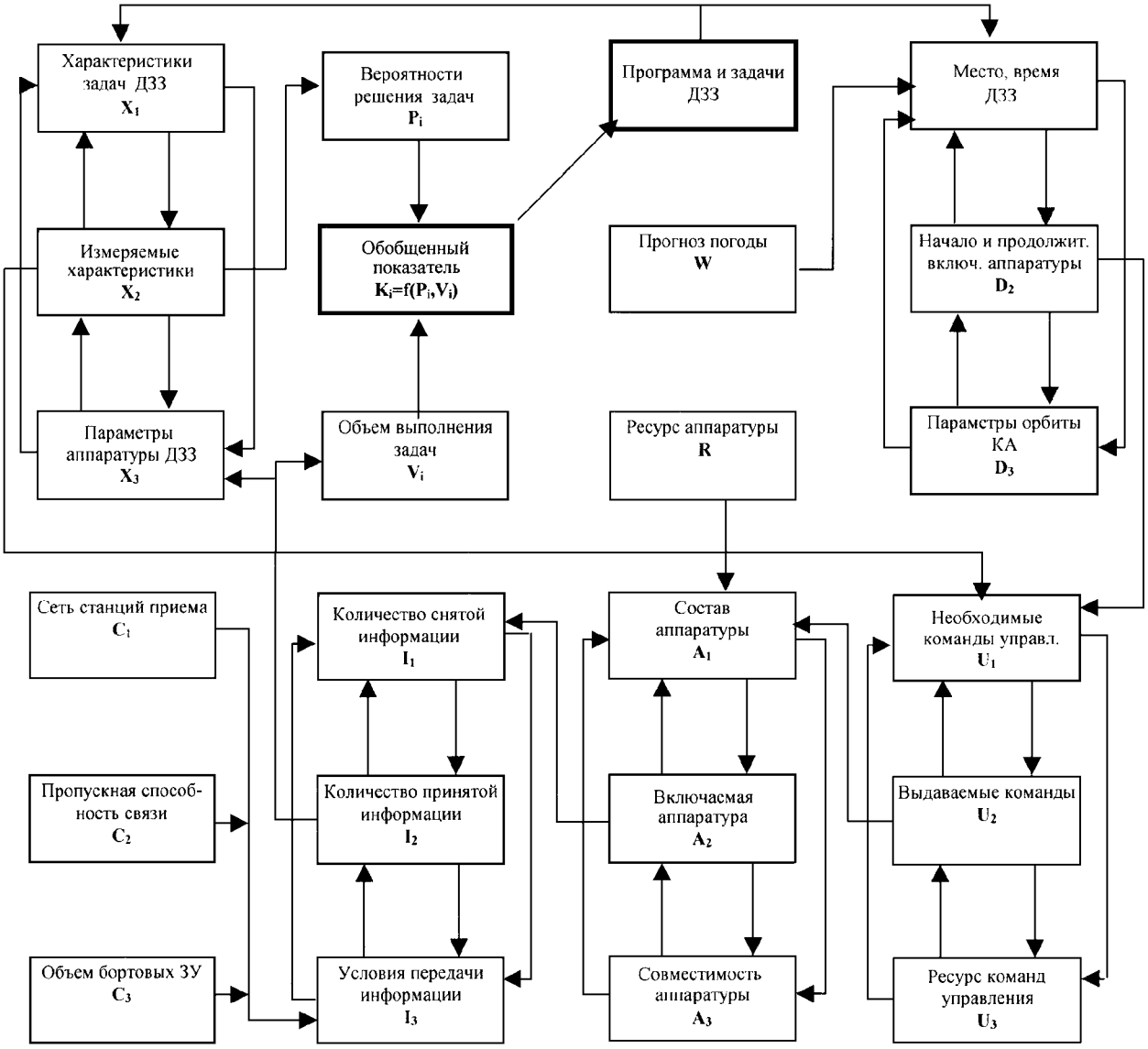
— разработки метода оценки взаимных влияний модулей по информации о фактических сценариях развития системы.

Концепция декомпозиции и синтеза предполагает разложение сложной системы, моделирующей комплекс для решения задач на основе ДЗЗ, на отдельные подсистемы с последующим выбором из них наиболее важных с точки зрения целей управления. Объединение выбранных подсистем в общую структуру модели управления выполнением задач ДЗЗ производится с учетом установленных экспертами причинно-следственных зависимостей.

С этих позиций рассмотрим возможный вариант построения концептуальной модели космических исследований ДЗЗ с иллюстрацией причинно-следственных связей (рисунок).

Модель включает следующие модули: X_1 — характеристики задач программы ДЗЗ, X_2 — измеряемые характеристики, X_3 — параметры аппаратуры ДЗЗ, D_1 — место и время зондирования (интенсивность потока зондируемых районов), D_2 — начало и продолжительность включения аппаратуры, D_3 — параметры полета космического аппарата (КА), U_1 — команды управления, необходимые для выполнения задач ДЗЗ, U_2 — выдаваемые команды управления, U_3 — ресурс команд управления, A_1 — требуемый состав аппаратуры ДЗЗ, A_2 — включаемая аппаратура, A_3 — ограничения по совместимости работы различных блоков аппаратуры, по максимальной длительности непрерывной работы аппаратуры и по минимальному времени после предыдущего включения, I_1 — количество снятой информации, I_2 — количество информации, принятой на пунктах приема информации (ППИ), I_3 — пропускная способность каналов связи и сети станций приема, R — ресурс бортовой аппаратуры, P_i — вероятности решения задач ДЗЗ, V_i — объем выполнения заявки ДЗЗ, $K_i = f(P_i, V_i)$ — общий показатель выполнения программы ДЗЗ, W — прогноз погоды.

Элемент системы планирования КЭ в системе ДЗЗ, представленный в блоках X_1, X_2, X_3, строится на взаимодействии возможностей X_3 аппаратуры ДЗЗ разрабатываемого (действующего) КА и требований X_1 пользователей информации ДЗЗ. Пользователь стремится получить информацию с характеристиками, которые требуются для решения его задач, значения параметров аппаратуры КА обусловлены техническими и экономическими возможностями. Результатом баланса интересов являются зондируемые характеристики X_2. Внешним воздействием на элемент системы X_1, X_2, X_3 являются задачи программы ДЗЗ. Блок X_2 вырабатывает внешнее воздействие на блок U_1 и определяет один из показателей выполнения программы ДЗЗ — вероятности P_i решения задач ДЗЗ.



Концептуальная модель космических исследований ДЗЗ

Оценка эффективности выполнения программы ДЗЗ производится в соответствии с полученным на основании системного подхода значением вероятности решения поставленных задач ДЗЗ заданным составом аппаратуры КА [3]. По вычисленным вероятностям производится определение состава аппаратуры, которая должна производить измерения с борта КА.

Программа ДЗЗ, как внешнее воздействие на элемент, включающий блоки D_1, D_2, D_3, определяет для D_1 координаты зондируемых территорий Земли при указанной дате съемки и допустимом угле Солнца. При определении времени включения аппаратуры необходимо учитывать также прогноз погоды W. КА осуществляет облет Земли по орбите с заданными характеристиками D_3. В результате учета указанных факторов определяется время включения аппаратуры D_2 из условия нахождения КА над указанными территориями и в определенные интервалы суточного времени. Блок D_2 задает внешнее воздействие на блок U_1 системы управления.

Траектория полета КА является функцией следующих параметров: высота круговой орбиты h, на-

клон орбиты γ, период вращения T, время t. Положение аппарата может быть определено в географических координатах широты φ и долготы λ, задаваемых функциями параметров орбиты. Условие нахождения КА в месте зондирования, определяемом требованиями задачи, записывается в виде равенств

$$\varphi(\gamma, h, T, t) = \varphi_Z, \lambda(\gamma, h, T, t)=\lambda_Z, t=tc_z, \qquad (1)$$

где φ_Z, λ_Z — координаты начала зондирования и tc_Z — суточное время, заданные в программе ДЗЗ. Исходя из размеров зондируемого участка, определяется продолжительность зондирования Δt. Прогноз погоды является функцией времени $W(t)$, накладывающей ограничения на условия (1). Функция $W(t)$ имеет вид $W(t) = 0$ при неблагоприятном для ДЗЗ прогнозе и $W(t) = 1$ при благоприятном.

Перечень измеряемых характеристик и время зондирования являются внешними входными данными блока баланса управления. Команды управления на включение необходимой аппаратуры ДЗЗ U_2 определяются в блоках U_1, U_2, U_3 как баланс внешнего воздействия от блоков X_2, D_2, внутренних взаимодействий и ресурса команд U_3 аппаратуры управления. Блок U_2 является внешним воздействием на блок A_1 и задает время включения необходимых приборов ДЗЗ.

Наземный комплекс управления в соответствии с его техническими характеристиками имеет определенный ресурс команд управления работой аппаратуры ДЗЗ (U_3) и содержит разовые команды в сеансе связи в количестве N_{RK}, программные в количестве N_{PK} и программные в цикле управления в количестве N_{PKU}.

В блоке U_1 производится перевод характеристик, подлежащих зондированию в определенное время, в соответствующий набор команд управления. Набор команд сортируется в соответствии с их приоритетом и сравнивается с ресурсом команд управления U_3. В случае недостаточного ресурса команд управления производится отбор команд с высшим приоритетом, которые обозначаются как U_2, при достаточном ресурсе — выполняется условие $U_2 = U_1$.

Выбор включаемой аппаратуры ДЗЗ A_2 производится как баланс заявки на зондирование A_1 с учетом ресурса аппаратуры R и возможности совместной работы необходимых приборов и продолжительности этой работы A_3.

Возможность включения аппаратуры определяется из логических уравнений совместимости с другой аппаратурой, оценки времени после предыдущего включения, длительности настоящего включения и ресурса аппаратуры.

Необходимость включения аппаратуры A^i, A^j задается функциями $A^i(t)$, $A^j(t)$ следующего вида $A^i(t) = 1$, $A^j(t) = 1$, при включенной аппаратуре и $A^i(t) = 0$, $A^j(t) = 0$, при выключенной аппаратуре. Совместное включение различной аппаратуры выражается функцией $A^{ij}(t) = A^i(t) \cap A^j(t)$. Если для всех значений t функция $A^{ij}(t) = 0$, то в процессе выполнения программы ДЗЗ аппаратура A^i, A^j совместно не включается. Если имеются значения t, для которых $A^{ij}(t) = 1$, это свидетельствует о необходимости проверки условия возможности совместной работы. При запрещенной совместной работе аппаратуры A^i, A^j принимается решение о включении только той аппаратуры, которая обеспечивает решение задач высшего приоритета.

При необходимости включения аппаратуры A^i требуется проверить, сколько прошло времени $A^i(t_0 - t_V)$ после предыдущего выключения этой аппаратуры. Аппаратура может быть включена при условии, что $A^i(t_0 - t_V) > A^i(\min_V)$.

После включения аппаратуры A^i должна производиться оценка длительности функционирования при данном включении в соответствии с выражением $A^i(\Delta t) = \sum_{t_0} A^i(t)$, при условии $A^i(\Delta t) > A^i(\max)$ аппаратура A^i выключается. Также должна определяться полная наработка времени аппаратурой A^i согласно выражению $A^i(T) = A^i(T_0) + \sum_{t_0} A^i(t)$. Неравенство $A^i(T) > A^i(\max)$ является условием того, что ресурс аппаратуры A^i исчерпался.

Количество принятой с борта КА информации I_2, определяется как результат динамического баланса между количеством снимаемой информации I_1 и условиями передачи информации I_3. Режим передачи информации обусловлен взаимным положением зондируемых территорий и сетью станций приема C_1, пропускной способностью бортовой аппаратуры связи C_2 и объемом бортовых запоминающих устройств C_3.

Оценка возможности передачи снимаемой информации производится исходя из взаимного расположения снимаемой территории и станций приема информации ДЗЗ. Для i-го района зондирования с широтой и долготой φ^i_Z, λ^i_Z вычисляются расстояния до ППИ в соответствии с выражением

$$R(\varphi^i_Z, \lambda^i_Z | \varphi^j_P, \lambda^j_P) = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2}, \qquad (2)$$

где

$$Z_1 = (r^i_Z - r^j_P), Z_2 = (r^i_Z)(\varphi^i_Z - \varphi^j_P),$$
$$Z_3 = (r^i_Z \sin\varphi^i_Z)(\lambda^i_Z - \lambda^j_P).$$

Также определяется j-я станция приема с координатами φ^j_P, λ^j_P, расстояние до которой наименьшее:

$$\min_{j}[R(\varphi_Z^i, \lambda_Z^i | \varphi_P^j, \lambda_P^j)]. \quad (3)$$

Затем определяется условие нахождения КА в зоне покрытия этой станции приема, определяемое следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} \varphi_P^j - \Delta\varphi_P^j < \varphi_Z^i < \varphi_P^j + \Delta\varphi_P^j, \\ \lambda_P^j - \Delta\lambda_P^j < \lambda_Z^i < \lambda_P^j + \Delta\lambda_P^j, \end{aligned} \quad (4)$$

где значения $\Delta\varphi_P^j$, $\Delta\lambda_P^j$ определяют зону видимости КА по двум координатам. При выполнении двух условий (4) производится непосредственная передача зондируемой информации, в противном случае — запись в запоминающее устройство (ЗУ).

Возможность записи снимаемой информации зависит от размера территории ДЗЗ и объема ЗУ. Снимаемая площадь в зависимости от пространственного разрешения и разрядности информации для каждого канала требует $a(A^i)\times b(A^i)\times m(A^i)$ пикселов и условием полной записи в ЗУ (суммарной емкости E) зондируемой информации является $\sum_i a(A^i)b(A^i)m(A^i) \le E$, где $a(A^i)\times b(A^i)$ — количество пикселов в изображении аппаратуры A^i, $m(A^i)$ — разрядность канала A^i.

Возможность передачи информации зависит от объема передаваемой информации (несколько каналов связи) и пропускной способности каналов. Снимаемая или записанная в ЗУ информация во время сеанса связи передается на землю через каналы связи с пропускной способностью V^i в течение времени сеанса t^i. Передача всей зондируемой и записанной в ЗУ информации в сеансе связи возможна при условии $\sum_i a(A^i)b(A^i)m(A^i) \le \sum_i V^i t^i$. Если последнее условие не выполняется, то в первую очередь производится непосредственная передача зондируемой информации, затем возможное количество из ЗУ, а затем производится поиск следующей ближайшей станции приема в соответствии с выражениями (2), (3).

Блок I_2 является показателем количества принятой информации ДЗЗ и определяет объем выполнения задач ДЗЗ V^i, который учитывается в обобщенном показателе K_{ij}. Этот показатель определяет обратную связь на программу и параметры аппаратуры ДЗЗ.

Дальнейшим шагом построения концептуальной модели КЭ в системе ДЗЗ на основе метода адаптивного баланса влияний является формализация модели путем составления соответствующей системы уравнений.

Полученный опыт использования метода системной динамики [4] и проведенные нами предварительные исследования показали, что системный подход может быть применен в качестве инструмента при имитационном моделировании и разработке информационной технологии оценки состояния и управления устойчивым развитием космической системы ДЗЗ.

1. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.—224 с.
2. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978. — 271 с.
3. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія.— 2001.—7, № 5/6.— С. 75—79.
4. Федоровский А. Д., Тимченко И. Е., Сиренко Л. А., Якимчук В. Г. Об эколого-экономической модели комплексного водопользования в гидроэнергетике // Доповіді Національної академії наук України.—2001.—1. С. 140—143.
5. Forrester J. W. Industrial Dynamics. Cambridge MA, Productivity Press. 1961.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 89—91

Комбінація цифрової моделі рельєфу із зображеннями «Landsat-7» для визначення топографічних характеристик місцевості з метою проведення радіометричної корекції

О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева, З. М. Шпортюк

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Виконано роботи, які у підсумку ставлять за мету проведення радіометричної ортокорекції багатозональних знімків «Landsat-7» і проводяться в рамках теми «Дослідження стану лісових масивів Сибіру з використанням космічної зйомки в плані співробітництва між Комітетом із системного аналізу при Президії НАН України та Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу (IIASA, Австрія) за спільним дослідницьким проектом «Лісове господарство».

Досліджувана територія розташована в межах центральної частини Сибіру. Її протяжність складає 3361 км з заходу на схід і 1681 км з півночі на південь, загальна площа 5649841 км^2. За природними умовами район робіт дуже неоднорідний і поділяється на три області — західну, східну та південну. Західна область розташована в межах Західно-Сибірської рівнини, східна — в межах Середньо-Сибірського плоскогір'я, а південна відповідає Південно-Сибірській гірській області. Таким чином, північ території — це рівнина, а південь — гори.

Ліси в гірській частині на півдні Сибіру розташовані на північному макросхилі та в осьовій частині Західного Саяну. На вододілах ліси в основному представлені темнохвойними ялицевими лісами з домішками кедру, а вздовж долин річок можуть переважати листяні ліси, домінуючою породою в яких є береза та осика. Досліджувана територія — це система сильно розчленованих гірських хребтів, витягнутих переважно в широтному напрямку, що з півночі обмежена неширокою смугою низьких гір. Абсолютні позначки вододілів коливаються від 1200 м до 1500 м над рівнем моря. В осьовій частині Західного Саяну, де хребти утворюють вододіл всієї системи, висота досягає 2000—2500 м. Річкові долини розташовані на позначках 500—800 м і, таким чином, різниця висот на окремих ділянках може досягати 1000—1700 м. Саме для таких районів для вивчення лісів за даними багатозональної космічної зйомки необхідна радіометрична ортокорекція даних каналів космічного знімка. Без виконання такої корекції не можна сподіватись на якісні результати, бо спектральні характеристики лісів одного класу на різних схилах можуть істотно відрізнятись тільки внаслідок різної орієнтації схилу щодо сонячного освітлення.

На рис. 1 наведено фрагмент космознімка «Landsat-7» (10.09.2000 р.) ділянки території, для якої проводяться модельні розрахунки. Ділянка знаходиться в межах з координатами 92°48′48″ — 92°52′48″ с.д. та 53°02′32″ — 53°00′56″ п.ш. В статті наведено результати першого етапу робіт, які ставлять за мету визначення топографічних характеристик місцевості, необхідних для проведення радіометричної корекції знімка.

Використання цифрової моделі рельєфу (DEM), побудованої для знімка описаної вище території (рис. 1), одержаного з КА «Landsat-7» (10.09.2000 р.), дозволяє за описаною нижче методикою для кожного піксела зображення обчислити значення кутів нахилу та напрямку (які дорівнюють зенітному та азимутальному кутам) локальної поверхневої нормалі до похилої площини, дотичної до локальної поверхні в точці, яка збігається з центром піксела. Визначення цих кутів необхідне для проведення радіометричної корекції даних багатоспектральних зображень «Landsat-7» (10.09.2000 р.) при дослідженні гірських територій.

Як відомо [1, 2], косинус кута падіння i сонячних променів на довільно орієнтовану похилу площину визначається співвідношенням

$$\cos i = \cos\Theta_s\cos\Theta + \sin\Theta_s\sin\Theta\cos(\Psi - \Psi_s), \quad (1)$$

де Θ_s — зенітний кут Сонця, Ψ_s — азимут Сонця,

© О. І. САХАЦЬКИЙ, О. М. СИБІРЦЕВА, З. М. ШПОРТЮК, 2002

Рис. 1. Фрагмент знімку «Landsat-7» (10.09.2000 р.) одного з гірських районів Західного Саяну (Сибір). Білим прямокутником виділено тест-ділянку для досліджень

Рис. 2. Цифрова модель рельєфу — DEM тест-ділянки. Темний колір презентує малі підвищення, світлий — високі. Висоти змінюються від 462 до 992 м

Рис. 3. Зображення кутів нахилу поверхні тест-ділянки, одержаних з DEM, значення яких змінюються від 0 до 26°

Рис. 4. Зображення азимутів тест-ділянки, одержаних з DEM, значення яких змінюються від 0 до 360°

Рис. 5. Зображення значень cos*i*, обчислених за формулою (1). Темний колір презентує малі значення, світлий — великі

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 91—102

Θ — кут нахилу поверхні до горизонтальної площини, Ψ — азимут проекції нормалі до похилої площини на горизонтальну площину.

Зауважимо, що зенітний кут Сонця та його азимут задаються в супровідному файлі до зображень сенсора ETM + «Landsat-7». У випадку горизонтальної площини кут падіння сонячного променя дорівнює зенітному кутові Сонця. Якщо поверхня рельєфу не горизонтальна, то, використовуючи цифрову модель рельєфу DEM, рівняння локальної поверхні рельєфу можна записати в локальній прямокутній системі координат з центром в центрі піксела у вигляді $z = f(x, y)$. Тут введено позначення: z — вертикальна координата; x, y — координати на горизонтальні площині, вісь OY якої спрямована на північ, $f(x, y)$ — задана функція. Тоді кути Θ і Ψ визначаються із виразів

$$\cos\Theta = \left[1 + \left(-\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(-\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2\right]^{-1/2}, \qquad (2)$$

$$\cos\Psi = -\frac{\partial f}{\partial y} \cdot \left[\left(-\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(-\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2\right]^{-1/2}. \qquad (3)$$

Зображення цифрової моделі рельєфу DEM виділеної на рис. 1 тест-ділянки побудовано за допомогою програмних продуктів «ERDAS Imagine» і наведено на рис. 2. Зображення кутів нахилу та азимутів, одержаних для кожного піксела тест-ділянки із рівнянь (2) і (3), наведено на рис. 3 і 4. Рис. 5 представляє зображення cos$i$, обчисленого за формулою (1) для кожного піксела тест-ділянки. Очевидно, що точність обчислення величин кутів нахилу та азимуту локальної поверхні суттєво залежить від точності побудови цифрової моделі рельєфу для конкретного знімка «Landsat-7».

1. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П. Радиационный режим наклонных поверхностей. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.—216 с.
2. Yang C., Vidal A. Combination of Digital Elevation Models with «Spot»-1 HRV Multispectral Imagery for Reflectance Factor Mapping // Remote Sens. Environ.—1990.—32.—P. 35—45.

Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками

В. И. Кононов

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данные о Земле, полученные с помощью аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками находят все большее применение для решения разнообразных народнохозяйственных задач. Широкое применение этих данных и повсеместное внедрение цифровых технологий приводят к настоятельной необходимости разработки методик количественной оценки изобразительных возможностей качества этих данных. Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения, полученных дискретными приемниками, для целей картографии, и особенно для официального государственного картографирования территории, требует проведения количественной оценки качества изображения. Особо важной для оптимизации использования данных в картографии, снижения затрат на их приобретение, обработку и получение конечных результатов, удовлетворяющих требованиям нормативных документов, является оценка данных по критерию пространственного разрешения изображения на местности как одному из важнейших критериев, который позволяет судить о потребительских свойствах данных ДЗЗ. Поэтому назрела необходимость научного анализа различных подходов к оценке реального разрешения на местности систем дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, применяемых для решения различных природохозяйственных и специальных задач.

Для систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с аналоговыми фотоприемниками (в дальнейшем — аналоговые системы), типичным представителем которых являются аэрофотосистемы, разработаны классические методики оценки величины разрешения на местности, основанные на использовании понятия «разрешающая способность» [4]. Для параметров аналоговых (аэрофотографических) систем в Украине имеются разрабо-

© В. И. КОНОНОВ, 2002

танные нормативные документы и государственные стандарты [1, 8].

В отличие от этого, для цифровых аэрокосмических систем (ДЗЗ) с дискретными фотоприемниками (дискретных систем), нет общепринятых подходов и нормативных документов для оценки величины разрешения на местности. В дальнейшем мы будем рассматривать только панхроматические каналы высокого разрешения.

Широко применяемые в настоящее время для оценки качества изображений такие параметры дискретных систем, как линейный размер пикселя, приведенный к плоскости объектов съемки, и отношение сигнал/шум, связаны с величиной разрешения на местности, но не адекватны этой величине. При этом, как будет показано ниже, линейный размер пикселя является величиной неоднозначной, и разные фирмы трактуют эту величину по-разному.

Так как в терминологии оценки изображений, получаемых системами ДЗЗ с дискретными фотоприемниками, имеется много разночтений, возникла необходимость рассмотреть содержание основных терминов, используемых в данной работе.

Если разрешающая способность R является параметром бортовых систем ДЗЗ, то разрешение на местности ($R_м$) характеризует непосредственно изображение, получаемое данной системой. Таким образом, разрешение на местности является той величиной, по которой получатель судит о потребительских свойствах изображений.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 91—113

Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками

В. И. Кононов

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данные о Земле, полученные с помощью аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками находят все большее применение для решения разнообразных народнохозяйственных задач. Широкое применение этих данных и повсеместное внедрение цифровых технологий приводят к настоятельной необходимости разработки методик количественной оценки изобразительных возможностей качества этих данных. Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения, полученных дискретными приемниками, для целей картографии, и особенно для официального государственного картографирования территории, требует проведения количественной оценки качества изображения. Особо важной для оптимизации использования данных в картографии, снижения затрат на их приобретение, обработку и получение конечных результатов, удовлетворяющих требованиям нормативных документов, является оценка данных по критерию пространственного разрешения изображения на местности как одному из важнейших критериев, который позволяет судить о потребительских свойствах данных ДЗЗ. Поэтому назрела необходимость научного анализа различных подходов к оценке реального разрешения на местности систем дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, применяемых для решения различных природохозяйственных и специальных задач.

Для систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с аналоговыми фотоприемниками (в дальнейшем — аналоговые системы), типичным представителем которых являются аэрофотосистемы, разработаны классические методики оценки величины разрешения на местности, основанные на использовании понятия «разрешающая способность» [4]. Для параметров аналоговых (аэрофотографических) систем в Украине имеются разрабо-

© , 2002

танные нормативные документы и государственные стандарты [1, 8].

В отличие от этого, для цифровых аэрокосмических систем (ДЗЗ) с дискретными фотоприемниками (дискретных систем), нет общепринятых подходов и нормативных документов для оценки величины разрешения на местности. В дальнейшем мы будем рассматривать только панхроматические каналы высокого разрешения.

Широко применяемые в настоящее время для оценки качества изображений такие параметры дискретных систем, как линейный размер пикселя, приведенный к плоскости объектов съемки, и отношение сигнал/шум, связаны с величиной разрешения на местности, но не адекватны этой величине. При этом, как будет показано ниже, линейный размер пикселя является величиной неоднозначной, и разные фирмы трактуют эту величину по-разному.

Так как в терминологии оценки изображений, получаемых системами ДЗЗ с дискретными фотоприемниками, имеется много разночтений, возникла необходимость рассмотреть содержание основных терминов, используемых в данной работе.

Если разрешающая способность R является параметром бортовых систем ДЗЗ, то разрешение на местности ($R_м$) характеризует непосредственно изображение, получаемое данной системой. Таким образом, разрешение на местности является той величиной, по которой получатель судит о потребительских свойствах изображений.

Необходимо подчеркнуть принципиальное отличие разрешающей способности от разрешения на местности. Размерность разрешающей способности R, как указано в [1], — обратные линейные единицы (мм$^{-1}$, так как разрешающая способность обычно определяется в фокальной плоскости), размерность разрешения на местности $R_м$ — [м]. В некотором смысле разрешение на местности является величиной обратно пропорциональной по отношению к разрешающей способности.

Целью данной работы являются научное обоснование и разработка практической методики оценки величины разрешающей способности и разрешения на местности применительно к системам ДЗЗ с дискретными фотоприемниками.

Здесь необходимо сделать несколько замечаний.

Во-первых, подобной методики в законченном виде нет в известных нам литературных источниках.

Во-вторых, так как нас интересуют вопросы оценки изображений, полученных в условиях реальной съемки, то возникает задача учета влияния многочисленных факторов реальной съемки, отрицательно влияющих на качество изображения. Задача это достаточно сложная и требует применения статистических методов и разработки специального математического обеспечения [10]. Поэтому, чтобы получить первоначальные реальные результаты, мы будем использовать приближенные методики, учитывающие влияние только основных факторов.

В-третьих, в качестве основного методического подхода для получения окончательных выражений нами будут использованы возможные аналогии между разработанным методом расчета аэрофотографических (аналоговых) систем и методом расчета дискретных систем (при максимально возможном учете влияния фактора дискретизации).

Принятый методический подход определяет порядок изложения материалов научного обоснования методики: вначале будут изложены известные материалы применительно к аэрофотосистемам, затем рассматриваются особенности построения изображений дискретными системами и в заключение — метод расчета дискретных систем, использующий возможные аналогии с методом расчета аэрофотосистем.

Под разрешением на местности (spatial resolution) нами понимается характеристика изображения, создаваемого данной системой, определяемая размером наименьшего объекта на земной поверхности (протяженного или компактного) заданного контраста, который может быть обнаружен на этом изображении с заданной вероятностью.

В качестве объектов, минимально обнаруживаемые размеры которых принимаются в качестве величины разрешения на местности, как правило, принимаются малоразмерные компактные объекты, близкие по форме к квадрату или кругу, или узкие протяженные объекты. В первом случае за разрешение на местности принимается величина стороны квадрата или диаметр круга, во втором — ширина протяженного объекта. Многочисленные статистические исследования процессов обнаружения компактных и протяженных объектов показали, что при прочих равных условиях размер на местности компактных объектов примерно в два раза превосходит ширину протяженных объектов [1].

2. КЛАССИЧЕСКОЕ ПОНЯТИЕ КРИТЕРИЯ «РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ» И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Рассмотрим вначале определения основных терминов, касающихся разрешающей способности и разрешения на местности для аналоговых систем, в частности для аэрофотосистем. Эти понятия отражены в ГОСТе СССР 2395-79 [1] (соответствующий ГОСТ Украины еще не разработан). Такой порядок изложения целесообразен из соображения, что впоследствии можно будет установить возмож-

ные соответствия с аналогичными терминами для дискретных систем.

Разрешающая способность R: «Характеристика аэрофотоаппарата, оптико-фотографической системы, аэрофотоматериала, определяемая максимальной пространственной частотой периодической решетки, штрихи которой визуально различимы в фотографическом изображении, образованном данной системой при использовании в качестве объекта стандартной миры заданного контраста» (пункт 107 ГОСТ 2395-79).

Следует обратить внимание на важные особенности этого определения. Во-первых, это совместная характеристика оптической системы и фотоприемника, которая определяется в наземных условиях, а поэтому такие факторы полета, как сдвиги изображения и влияние атмосферы, не учитываются. Во-вторых, эта величина определяется только с использованием стандартных изображений заданного контраста, называемых мирами. В-третьих, и это самое важное: величина разрешающей способности определяется максимальной пространственной частотой той группы штрихов периодических решеток, которые визуально различимы в изображении, полученном данной системой.

Таким образом, размерность разрешающей способности соответствует размерности пространственной частоты.

Пространственная частота N: «Число периодов синусоидального или прямоугольного распределения интенсивности излучения, приходящееся на единицу длины» (пункт 93 ГОСТ 2395-79).

Здесь наиболее важно то, что пространственная частота определяется числом периодов периодического сигнала, которые приходятся на единицу длины. Период включает в себя два полупериода, что в приложении к изображению стандартной миры включает в себя два штриха — черный и белый. Таким образом, величина периода определяется размером двух штрихов, а величина пространственной частоты обратна этому размеру, и ее размерность обратна линейной величине (1/мм в фокальной плоскости, 1/м в плоскости земной поверхности):

$$N = 1/(2\Delta_{ш}), \qquad (1)$$

где $\Delta_{ш}$ — ширина одного штриха соответствующей группы стандартной миры [мм, м]; N — пространственная частота [$мм^{-1}$, $м^{-1}$].

В приложении к дискретным системам ширина штриха в фокальной плоскости приближенно соответствует линейному размеру элементарного фотоприемника.

Рассмотренное нами понятие «разрешающая способность» аэрофотосистем определяется в лабораторных условиях и не учитывает влияние факторов полета, ухудшающих качество изображений. Для определения размеров наименьшего одиночного объекта, дешифрируемого (обнаруживаемого) на аэроснимке, необходимо оценить реальную разрешающую способность системы с учетом влияния вышеприведенных факторов полета.

Есть методики определения разрешающей способности аэрофотосистемы в полете, для которых создаются специальные полигоны, где на земной поверхности выкладывается набор мир, размеры которых соответствуют масштабам съемки. Эти методики ввиду своей трудоемкости для космических систем практического применения не нашли.

Для аэрофотосистем в настоящее время разработаны аналитические методики определения разрешающей способности в полете. Современные методики расчета реальной разрешающей способности аэрофотосистемы в полете основаны на использовании аппарата функций передачи модуляции (ФПМ) отдельных звеньев системы и кривой пороговой модуляции аэрофотоматериала [4, 12].

Рассмотрим упрощенную схему прохождения информации в аэрокосмической системе ДЗЗ, представленную на рис. 1. В этой схеме отражены основные факторы, влияющие на качество изображения в условиях реальной съемки, при этом каждый фактор представлен отдельным звеном:

1) сигнал от стандартной миры контраста $k = (B_{max} - B_{min})/(B_{max} + B_{min})$, где B_{max} и B_{min} — максимальное и минимальное значения яркости объекта;

2) звено влияния атмосферы ($k_{ат}$ — коэффициент ослабления контраста атмосферой за счет светорассеяния, $T_{тур}(N)$ — ФПМ, отражающая влияние турбулентности атмосферы);

3) звено учета влияния сдвигов изображения ($T_{сд}(N)$ — ФПМ сдвигов, $t_{ф}$ — величина выдержки, с);

4) звено учета влияния аберраций оптической системы ($T_{аб}(N)$ — ФПМ влияния аберраций);

5) звено учета влияния дифракции оптической системы ($T_{диф}(N)$ — ФПМ влияния дифракции);

6) Звено учета дефокусировки ($T_{деф}(N)$ — ФПМ влияния дефокусировки);

7) звено учета влияния фотоприемника — аэрофотоматериала ($T_{фп}(N)$ — ФПМ фотоприемника);

8) звено учета шумов фотоприемника ($k_{пор}(N)$ — кривая пороговой модуляции фотоматериала или фотоприемника), $R^{1}{}_{k}$ — разрешающая способность в полете [$мм^{-1}$].

Структурная блок-схема на рис. 1 полностью применима для анализа аэрофотосистем, однако она учитывает только основные факторы, влияющие на результирующее качество аэрофотоизображения. Следует отметить, что все характеристики

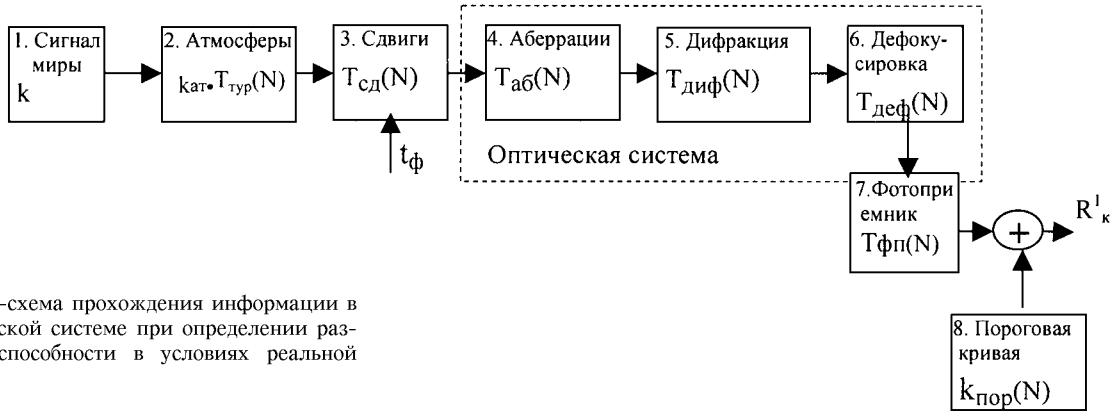


Рис. 1. Блок-схема прохождения информации в аэрокосмической системе при определении разрешающей способности в условиях реальной съемки

элементов блок-схемы рассматриваются в фокальной плоскости систем.

Результирующая ФПМ аэрофотосистемы с учетом факторов полета будет иметь вид

$$T_{\Sigma}(N) = \\ = T_{\text{тур}}(N)\cdot T_{\text{сд}}(N)\cdot T_{\text{аб}}(N)\cdot T_{\text{диф}}(N)\cdot T_{\text{деф}}(N)\cdot T_{\text{фп}}(N), \quad (2)$$

где $T_{\Sigma}(N)$ — результирующая ФПМ аэрофотосистемы в полете; $T_{\text{фп}}(N)$ — ФПМ аэрофотоматериала; остальные составляющие соответствуют обозначениям на рис. 1.

Разрешающая способность при известной результирующей ФПМ — $T_{\Sigma}(N)$ определяется с использованием эмпирической кривой пороговой модуляции $k_{\text{пор}}(N)$ [4]:

$$k_{\text{пор}}(N) = \sqrt{0.05^2 + 0.002\cdot\sigma_{\text{D}}^2\cdot N^2}, \quad (3)$$

где σ_{D} — среднее квадратичное значение шумов гранулярности фотоматериала, измеренное апертурой 400 мкм^2 в величинах оптической плотности (величина σ_{D} зависит от площади измерительной апертуры [4]).

Кривая пороговой модуляции $k_{\text{пор}}(N)$ учитывает влияние на величину разрешающей способности шумов системы (σ_{D}). Точка пересечения $k_{\text{пор}}(N)$ с кривой результирующей ФПМ системы $T_{\Sigma}(N)$ соответствует значению разрешающей способности аэрофотосистемы в полете — R_{Σ}^{1}. Выражение (3) приведено для случая, когда коэффициент контрастности фотоматериала $\gamma = 1$.

Разрешающая способность аэрофотосистемы в полете $R_{\text{к}}^{1}$ для контраста k получается решением уравнения:

$$k\cdot k_{\text{аТ}}T_{\Sigma}(R_{\text{к}}^{1}) = k_{\text{пор}}(R_{\text{к}}^{1}). \quad (4)$$

Уравнение (4) решается либо численным, либо графическим методом.

Следует остановиться на связи полученной величины разрешающей способности $R_{\text{к}}^{1}$ с минимальным диаметром компактного объекта (круга или квадрата), дешифрируемого на изображениях с высокой вероятностью ($\approx$ 0.8). По исследованиям, проведенным в Институте им. Можайского (Санкт-Петербург) [6] с использованием больших объемов статистических материалов по дешифрированию аэрокосмических фотографических снимков, эта связь определяется эмпирическим выражением

$$d \approx \frac{2.5...3.3}{R_{\Sigma}^{1}}, \quad (5)$$

где d, мм — диаметр дешифрируемого компактного объекта минимальных размеров в плоскости снимка.

В этом случае величина разрешения на местности будет равна

$$R_{\text{м}} \approx d\cdot m = \frac{(2.5...3.3)m}{R_{\Sigma}^{1}}. \quad (6)$$

Такова общепринятая в настоящее время методика расчета разрешающей способности аэрофотосистем с учетом влияния факторов полета. Не будем останавливаться на выражениях для ФПМ, входящих в формулу (2), так как рассмотренная выше методика приведена в виде примера, по аналогии с которой будет разрабатываться методика для дискретных систем.

3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим возможности учета статистического характера процесса обнаружения и распознавания и влияния на этот процесс разрешающей способности аэрофотосистем с учетом влияния факторов реальной аэрофотосъемки.

Известна классическая формула А. И. Живичина, которая связывает вероятность обнаружения и

распознавания объектов с их контрастом и особенностями их формы, разрешающей способностью аэрофотосистемы в полете и масштабом съемки [2]:

$$p = \exp\left[-\left(\frac{m}{(L/B)2R^1_{1.0}\sqrt{\Delta D}}\right)^2\right], \quad (7)$$

где p — вероятность дешифрирования объекта; m — знаменатель масштаба съемки (1:m, например 1:1000); $R^1_{1.0}$, мм$^{-1}$ — разрешающая способность системы в полете по контрасту k = 1.0; L, мм — максимальный линейный размер компактного объекта на местности; B — «коэффициент формы» — статистический коэффициент, определяющий, какая часть объекта является наиболее существенной для его распознавания [2]; ΔD — тоновый контраст изображения объекта в единицах оптической плотности D [2].

Дальнейшие исследования показали, что в выражении (7) член $R^1_{1.0}\sqrt{\Delta D} \approx R^1_к$, поэтому перепишем это выражение в виде

$$p = \exp\left[-\left(\frac{m}{(L/B)2R^1_к}\right)^2\right]. \quad (8)$$

Решая это уравнение относительно максимального размера дешифрируемого объекта L, получим

$$L = \frac{mB}{2R^1_к\sqrt{(-\ln p)}}. \quad (9)$$

Значение величины $\sqrt{(-\ln p)}$ для различных значений вероятности p приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения величин $\sqrt{(-\ln p)}$

p	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\sqrt{(-\ln p)}$	0.93	0.715	0.6	0.47	0.32

Как видно из формулы (9) и данных табл. 1, при повышении вероятности дешифрирования с 0.7 до 0.9 (при прочих равных условиях) размер дешифрируемого объекта на местности L увеличивается практически в два раза.

Обычно большинство потребителей удовлетворяет уровень вероятности p = 0.7...0.8.

При определении величины разрешения на местности $R_м$ нас интересуют размеры минимальной детали на местности, близкие по форме к квадрату или кругу. Исходя из экспериментальных данных, приведенных в работе [2, табл. 22], среднее значение коэффициента B для фигур типа круг или квадрат будет 1.36±0.27. С учетом значения B формула (9) для случая распознавания принимает вид:

$$L = \frac{0.68m}{R^1_к\sqrt{(-\ln p)}}, \quad (10)$$

где

$$m = H/f, \quad (11)$$

H— высота полета, f — фокусное расстояние оптической системы.

Для случая обнаружения, когда не надо определять особенности формы объекта, что соответствует условиям определения разрешения на местности, коэффициент $B \approx 1$. В этом случае величина L в выражении (9) тождественна величине разрешения на местности, а выражение (10) можно переписать в виде

$$L = R_м = \frac{0.51m}{R^1_к\sqrt{(-\ln p)}}. \quad (12)$$

4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СИСТЕМАМИ С ДИСКРЕТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ И ТЕРМИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭТОГО ПРОЦЕССА

При анализе систем с дискретными фотоприемниками необходимо иметь в виду, что схема прохождения информации в этих системах подобна схеме прохождения информации в аналоговых системах, представленной на рис. 1, с двумя уточнениями: во-первых, вместо сигнала стандартной миры в звене 1 используется сигнал элементарного объекта (квадрата или круга — $S_{с.вх}(N)$); во-вторых, вместо аналогового фотоприемника (аэрофотопленки) звено 7 отражает свойства отдельного дискретного фотоприемника, из которых составлена линейка, или матрица, дискретной системы — $T_{фп}(N)$.

Влияние оптической системы, дефокусировки и факторов реальной аэрокосмической съемки на сигналы остаются теми же, что и представленные в схеме на рис. 1.

Наиболее употребляемой величиной для оценки качества изображений аэрокосмических датчиков с дискретным фотоприемником является размер пикселя. Отметим, что термин «пиксель» применять в отношении аэрокосмических систем ДЗЗ с дискретными фотоприемниками не вполне корректно, более точным является термин «линейный размер элементарного фотоприемника линейки или матрицы, или его геометрическая проекция на земной поверхности» (см. комментарии в разд. 6).

Однако в фирменных каталогах, где приводятся параметры этих датчиков изображений, данная величина трактуется различно.

Для некоторых систем, к которым относятся и системы спутников IRS-1C, размер пикселя на земной поверхности является геометрической проекцией линейного размера пикселя линейки фото-

приемников, т. е. величина пикселя на земной поверхности получается простым умножением размера пикселя линейки фотоприемников на знаменатель масштаба съемки (размер пикселя IRS-1C на земной поверхности — 5.8 м). В этом случае не учитывается влияние атмосферы, сдвига изображения, дифракции и аберрации оптической системы, неточности фокусировки и других факторов, которые приводят к размытию пикселя (увеличению его размеров) и ухудшению разрешения на местности.

Для таких систем, как «Ikonos», указывается величина размера пикселя на местности: e = 1 м. Геометрическая проекция пикселя на поверхность Земли в этом случае будет 0.8 м (высота полета 681 км, фокусное расстояние 10 м, размер пикселя линейки Δ = 0.012 мм). Приводимая величина размера пикселя в 1.25 раза больше его геометрической проекции. Как показали расчеты по формулам, которые будут приведены ниже, это соответствует учету только дифракционной ФПМ оптической системы (без учета влияния центрального отверстия в зеркале зеркально-линзового объектива [6]).

Для системы IRS-1C приводимые размеры пикселя на земной поверхности 5.8 м строго соответствуют геометрической проекции размера пикселя линейки Δ = 0.007мм на земную поверхность с учетом масштаба съемки (H = 81700 м, f = 0.98 м, m = = 834000). Таким образом, в этом случае не учитывается влияние оптической системы и факторов полета на увеличение реальных размеров пикселя на земной поверхности.

Примеры параметров датчиков сигналов систем IRS-1C и «Ikonos» показывают, что фирмы в рекламных целях не учитывают влияние многих других факторов, увеличивающих размер проекции пикселя на поверхность Земли (атмосфера, остаточные сдвиги изображения при работе системы компенсации сдвигов и многие другие).

Теперь перейдем к особенностям формирования изображений дискретными фотоприемниками, которые определяют минимальные размеры элементов на местности, воспроизводимые системой на создаваемых ею изображениях. Эти же факторы определяют величину разрешения системы на местности или в фокальной плоскости.

Рассмотрим физические особенности формирования разрешающей способности в дискретных фотоприемниках, которые принципиально отличают эти фотоприемники от аналоговых, типичным примером которых являются фотографические пленки.

В этом смысле главной особенностью аналоговых фотоприемников является постоянство их свойств по поверхности фотоприемника. Куда бы ни попала светящаяся точка, эффект ее размытия будет одинаков, т.е. разрешающая способность таких фотоприемников по всей поверхности фотоприемника будет постоянна. Это позволяет достаточно строго использовать аппарат Фурье-преобразования для описания передаточных свойств таких фотоприемников (ФПМ фотографических материалов не изменяется по поверхности фотоприемника).

В дискретных системах передаточные свойства зависят от взаимного положения элементарного объекта на земной поверхности и мгновенной проекции на него пикселя дискретного фотоприемника в момент съемки. Если элементарный объект, размеры которого совпадают с размером проекции реального пикселя на поверхности Земли, полностью совпадает с проекцией пикселя, то он воспроизводится на изображении системы. В этом случае разрешение системы на местности равно проекции реального пикселя (с учетом всех дестабилизирующих факторов).

В случае попадания объекта на границу двух пикселей оба пикселя дают сигнал половинного контраста, а разрешение на местности будет определяться размером проекции двух пикселей, т.е. ухудшится в два раза.

В действительности может быть много случайных сочетаний взаимного положения объекта и проекции пикселей на поверхность Земли. Следует подчеркнуть, что в этом случае процесс формирования изображения дискретным фотоприемником носит принципиально случайный характер, зависящий от взаимного положения проекции пикселя на земную поверхность и точечного объекта на этой поверхности. Наиболее характерные варианты этих сочетаний рассмотрены на рис. 2 и 3. Там же рассмотрены варианты воспроизведения дискретным фотоприемником стандартной штриховой миры, по которой определяется разрешающая способность.

Рассмотрим два варианта формирования изображений, когда в качестве изображения используется штриховая мира, ширина проекции штриха которой равна размеру элементарного фотоприемника (а), и когда на фотоприемник проектируется изображение квадрата, совпадающее по размером с размером фотоприемника (б).

а. Штриховая мира (рис. 2).

В этом случае рассматриваются два положения: проекции штрихов миры полностью совпадают с

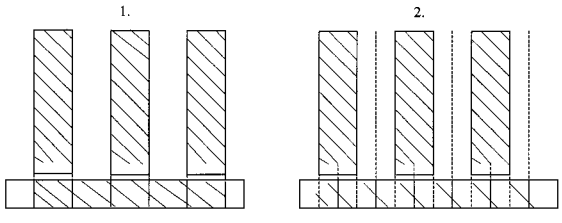


Рис. 2. Варианты взаимного положения штриховой миры и элементов дискретного фотоприемника (линейки)

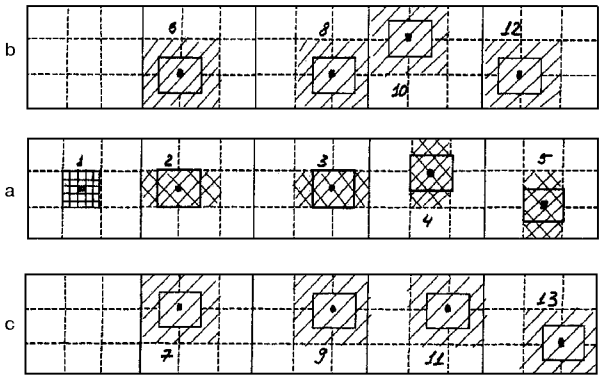


Рис. 3. Варианты взаимного положения проекций одиночного объекта и элементов дискретной фотоматрицы (выходные сигналы фотоприемников)

фотоприемниками матрицы (положение 1) и штрихи миры проектируются со смещением на половину элемента матрицы или линейки (положение 2).

В случае 1 происходит полное разрешение, в случае 2 мира совсем не разрешается (ровный серый фон). Остальные случаи сдвига включают в себя все промежуточные варианты (от полного разрешения до полного пропадания).

Рассмотренные варианты интересны тем, что далее, в случае равенства размеров элемента миры и элементов матрицы (условие частоты Найквиста), могут быть положения, когда разрешение миры отсутствует, т.е. условие Найквиста не обеспечивает 100 % вероятность разрешения.

б. Одиночный объект (рис. 3).

Объект представляет собой светящийся квадрат, размеры проекции которого на матрицу равны размерам элемента матрицы.

Исходное положение элемента изображения 1, случай полного совпадения элемента изображения и элемента матрицы. В этом случае на регистрирующем устройстве изображение будет соответствовать одному пикселю максимального контраста.

Рассмотрим все возможные положения проекции объекта на матрицу при смещении проекции на 0.5 размера элемента матрицы.

Здесь можно представить два варианта: первый вариант — смещение на 0.5 пикселя строго вверх или вниз и вправо или влево (строка *а* на рис. 3); второй вариант — смещение относительно смещенных на 0.5 пикселя проекций вверх или вниз, и вправо или влево еще на 0.5 пикселя. В первом варианте (строка *а* на рис. 3, положения 2—5) одновременно засвечиваются 2 пикселя, контраст при этом уменьшается в два раза.

Во втором варианте (строка *в* и *с* на рис. 3, положения 6—13) засвечиваются одновременно четыре пикселя, контраст при этом уменьшается в четыре раза. В этом случае, если исходный объект был малого контраста, то он может быть вообще не обнаружен на изображении.

Таким образом, из 13 возможных вариантов случайного положения объекта относительно элемента матрицы при дискретном смещении на 0.5 пикселя только один вариант (≈7 %) воспроизводится с полным контрастом; четыре варианта (≈31 %) воспроизводятся с контрастом 0.5 и восемь вариантов — с контрастом 0.25 (≈62 %).

Рассмотренный пример физически объясняет положение теоремы Найквиста, из которой следует, что проекция объекта в плоскости фотоприемника по линейному размеру должна в два раза превосходить размер элемента матрицы. В этом случае при любых смещениях проекции объекта относительно элементов матрицы, хотя бы один пиксель всегда будет воспроизводиться с полным контрастом, что существенно повышает вероятность обнаружения одиночного объекта.

Из рассмотрения примеров следует, что вариант, когда на изображении может быть воспроизведен объект или штрих миры, размеры которых соответствуют размеру проекции пикселя системы на земную поверхность, маловероятен.

Для получения устойчивых результатов воспроизведения объектов на изображениях, получаемых дискретными системами, принято ограничивать максимальную полосу пропускания пространственных частот системами так называемой частотой Найквиста [7], которая определяется выражением

$$N_{\text{н}} = \frac{1}{2\Delta}, \qquad (13)$$

где $N_{\text{н}}$, мм$^{-1}$ — пространственная частота, в фокальной плоскости соответствующая частоте Найквиста; Δ, мм — линейный размер пикселя дискретного фотоприемника.

Из сопоставления выражения (13) с выражением (1) можно сделать вывод, что частота Найквиста в некотором смысле подобна понятию «разрешающая способность», рассмотренному нами применительно к аналоговым системам. Частота Найквиста, как и разрешающая способность, является величиной, обратной периоду колебаний, т. е. обратной двум элементам дискретизации.

В этом смысле понятие частоты Найквиста хорошо согласуется с требованиями фундаментальной теоремы дискретизации — теоремы Котельникова [11].

Следует отметить, что при определении частоты Найквиста используют только размер элемента фотоприемника или его проекции на поверхность Земли, при этом не учитывается значительное увеличение размера пикселя за счет влияния факторов, отраженных на блок-схеме (рис. 1). Поэтому

выражение (13) дает верхнюю оценку разрешающей способности системы по контрасту 1.0. Реальная разрешающая способность систем всегда несколько ниже разрешающей способности, соответствующей частоте Найквиста.

Разрешение на местности $R_м$ по отношению к контрастным компактным объектам малых размеров определяется как величина, обратная разрешающей способности. Применительно к дискретным системам — это величина, обратная частоте Найквиста в фокальной плоскости системы:

$$R_м^1 = \frac{1}{N_н} \approx 2\Delta. \qquad (14)$$

Максимальная величина разрешения на местности в этом случае будет равна

$$R_{мmin} = R_м^1 m = 2\Delta \cdot m, \qquad (15)$$

где m — масштаб съемки.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИСТЕМАМ С ДИСКРЕТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Для расчета влияния на разрешающую способность дискретных фотоприемников основных факторов, приводящих к увеличению размера пикселя, воспользуемся методикой, аналогичной рассмотренной методике для аэрофотосистем. Это методика синтеза результирующих характеристик с использованием ФПМ. Перепишем выражение для результирующей ФПМ (2), соответствующей блок-схеме на рис. 1:

$$T_\Sigma(N) = k \cdot k_{ат} \cdot T_{тур}(N) \cdot T_{сд}(N) \times$$
$$\times T_{аб}(N) \cdot T_{диф}(N) \cdot T_{деф}(N) \cdot T_{фп}(N). \qquad (16)$$

Рассмотрим особенности некоторых выражений для ФПМ аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками.

Точные расчеты ФПМ отдельных звеньев аэрокосмических систем ДЗЗ (особенно атмосферы, дефокусировки и др.) являются достаточно сложной вычислительной задачей, требующей использования специальных программ. Поэтому нами будут использованы для приближенных расчетов упрощенные формулы или приближенные численные оценки минимально возможного влияния этих звеньев.

ФПМ, учитывающая влияние турбулентности атмосферы, определяется по приближенной формуле [12]

$$T_{ат}^1 \approx \exp(-2\pi^2 \sigma_т^2 f^2 N^2), \qquad (17)$$

где f, мм; $\sigma_т$ — константа, характеризующая влияние турбулентности атмосферы (для хороших условий наблюдения $\sigma_т$ имеет порядок 10^{-6}).

Следует отметить, что ФПМ — $T_{ат}^1(N)$ учитывает только влияние турбулентности атмосферы, но не учитывает влияние светорассеяния, вызываемого атмосферной дымкой (светорассеяние учитывается коэффициентом $k_{ат}$).

ФПМ сдвига изображения в фокальной плоскости:

$$T_{сд}(N) = \frac{\sin(\pi \Delta_{сд} N)}{\pi \Delta_{сд} N}, \qquad (18)$$

где $\Delta_{сд}$ — остаточный сдвиг изображения в фокальной плоскости при работе системы компенсации сдвигов.

В хороших системах компенсации сдвига изображения относительная величина $\Delta_{сд}$ имеет порядок 10...20 % от величины размера пикселя фотоприемника Δ.

Для определения ФПМ, которая учитывает влияние остаточной дефокусировки оптической системы, воспользуемся приближенной формулой

$$T_{деф}(N) \approx \exp\left[-2.5 A_{деф}^2 \left(\frac{f}{D}\right)^{-2} N^2\right], \qquad (19)$$

где $A_{деф}$, мм — величина смещения фокальной плоскости за счет остаточной дефокусировки; f/D — знаменатель относительного отверстия объектива оптической системы; f — фокусное расстояние объектива, мм; D — диаметр входного зрачка объектива, мм.

ФПМ в фокальной плоскости, обусловленная дифракцией на входном зрачке оптической системы в фокальной плоскости, определяется по приближенной формуле для средней длины волны видимого диапазона:

$$T_{диф}(N) \approx 1 - 7.510^{-4} \frac{f}{D} N. \qquad (20)$$

Выражение (18) не учитывает влияния центрального отверстия зеркала оптической системы на ФПМ.

ФПМ одного элемента дискретного фотоприемника:

$$T_{фп}(N) = \frac{\sin(\pi \Delta N)}{\pi \Delta N}, \qquad (21)$$

где Δ, мм — линейный размер пикселя (одного элемента) дискретного фотоприемника в фокальной плоскости.

Ранее при рассмотрении понятия «разрешающая способность» подробно рассматривался вопрос условности однозначного представления изобразительных свойств дискретных фотоприемников, которые зависят от взаимного положения элементов дискретного фотоприемника и проекции деталей объектов в фокальную плоскость. Было показано (12), что с высокой вероятностью о стабильности

изобразительных свойств этих фотоприемников можно говорить только при ограничении полосы пропускания системы частотой Найквиста. Учитывая сказанное выше ($N = N_н$), выражение для ФПМ дискретного фотоприемника (21) принимает вид

$$T_{фп}(N) = \frac{\sin(\pi 2\Delta N)}{\pi 2\Delta N}, \qquad (22)$$

Перепишем выражение (16) для результирующей ФПМ аэрокосмической системы с дискретными фотоприемниками в сокращенном виде:

$$T_{\Sigma}(N) = T_{диф}(N)T_{фп}(N). \qquad (23)$$

В выражении (23) не учитывается влияние таких факторов, как турбулентность атмосферы — $T_{тур}(N)$, остаточные сдвиги изображения — $T_{сд}(N)$, аберрации оптической системы — $T_{аб}(N)$. Уравнение для определения разрешающей способности дискретной системы в полете по аналогии с выражением (4) перепишем в виде:

$$kT_{\Sigma}(R^1_k) = k_{пор}(R^1_k). \qquad (24)$$

В уравнении (24), по сравнению с уравнением (4), принято, что $k_{ат} = 1$ (не учитывается влияние атмосферы).

Для расчета кривой пороговой модуляции $k_{пор}(N)$ (см. выражение (3)) необходимо знать суммарное среднеквадратичное значение шумов канала прохождения дискретной информации, выраженное в величинах оптической плотности. Эти сведения для сенсоров космических систем отсутствуют. Исключение составляет сенсор высокого разрешения систем IRS, для которого в [14] приводятся данные по отношению сигнал/шум в панхроматическом режиме в терминах оптической плотности (эта величина равна 64). Сравнивая это отношение с отношениями сигнал/шум аэрофотоматериалов, можно заключить, что эквивалентное значение шумов сенсора спутника IRS-1C в значениях оптической плотности имеет порядок $\sigma^1_D \approx 0.03...0.05$.

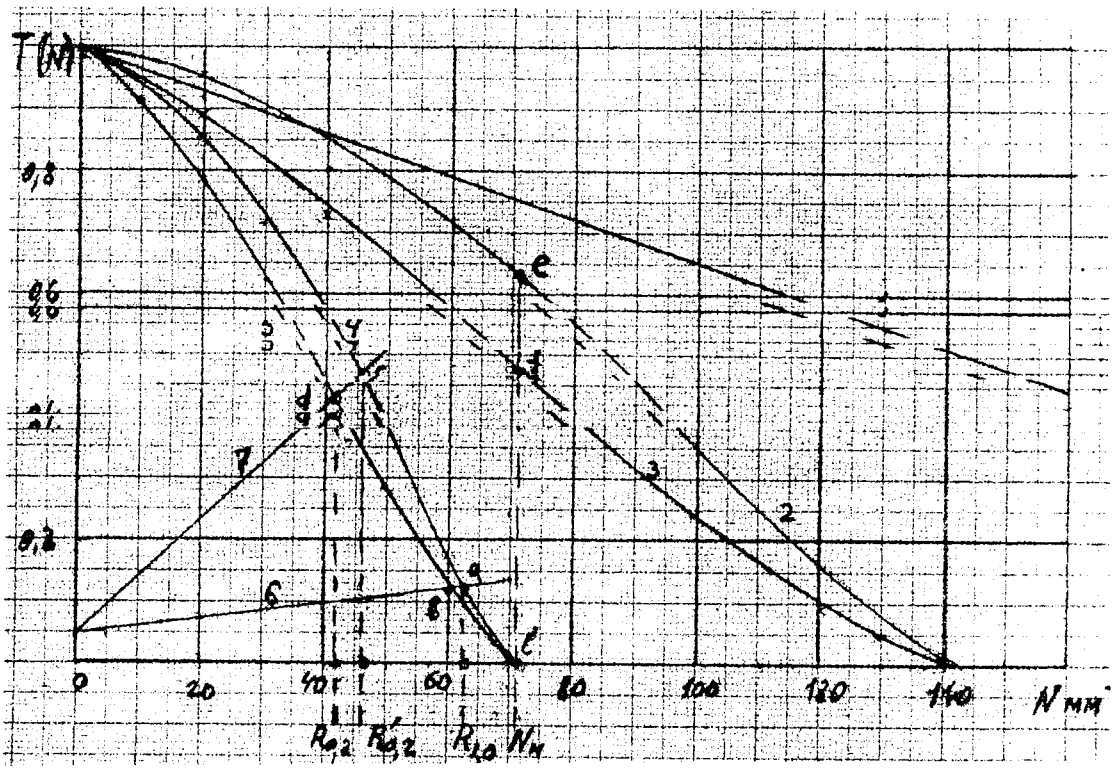


Рис. 4. Определение разрешающей способности дискретных систем графическим методом (на примере спутника IRS-1C). Графики: 1 — ФПМ оптической системы только с учетом дифракции ($D/f = 1{:}4.5$ см (18)); 2 — ФПМ одиночного пикселя ($\Delta = 0.007$ мм, см. (19)); 3 — ФПМ одиночного пикселя с учетом влияния оптики (произведение 1 и 2); 4 — ФПМ пикселя размером $2\Delta = 0.014$ мм (условие Найквиста см. (20)); 5 — ФПМ пикселя размером 2Δ с учетом влияния оптики (произведение 1 и 4); 5 — кривая пороговой модуляции ($k = 1.0$, $\sigma_D = 0.04$, см. (3)); 6 — кривая пороговой модуляции ($k = 0.2$, $\sigma_D = 0.04$, см. (3)). Точки на пересечении кривых: a — разрешающая способность $R_{1.0} = 63$ мм$^{-1}$ без учета влияния оптики; в — разрешающая способность $R_{1.0} = 61$ мм$^{-1}$ с учетом влияния оптики; c — разрешающая способность $R_{0.02} = 46$ мм$^{-1}$ без учета влияния оптики; d — разрешающая способность $R_{0.2} = 42$ мм$^{-1}$ с учетом влияния оптики; e — значение ФПМ одиночного пикселя на частоте Найквиста без учета влияния оптики равное 0.64; f — значение ФПМ одиночного пикселя на частоте Найквиста с учетом влияния оптики равное 0.47; $l = 71$ мм$^{-1}$ — частота Найквиста

Примем среднее значение $\sigma_D^1 \approx 0.04$. Шумы сенсоров других систем по сравнению с системой IRS-1C по данным фирменных каталогов имеют меньшую величину.

На рис. 4 приведен расчет разрешающей способности сенсора высокого разрешения индийского спутника IRS-1C в панхроматическом режиме. Исходные данные расчета [14]: высота полета H = = 817 км, фокусное расстояние оптической системы f = 980 мм, относительное отверстие оптической системы D/f = 1:4.5, линейный размер пикселя фотоприемника Δ = 0.007 мм. Для этого фотоприемника фирма дает разрешающую способность в фокальной плоскости 70 мм$^{-1}$ [14], что соответствует частоте Найквиста. Знаменатель масштаба съемки $m = H/f$ = 83300. Как было указано ранее, произведение размера пикселя на масштаб съемки дает размер на земной поверхности геометрической проекции пикселя $\Delta \cdot m$ = 0.007 мм · 834000 = = 5800 мм = 5.8 м (здесь используется термин Instantaneous Geometric Field of View [14]).

Рассмотрим результаты графических расчетов разрешающей способности, приведенных на рис. 4.

Разрешающие способности по контрасту k = 1.0 – $R_{1.0}$ с учетом и без учета влияния оптической системы (точки *в* и *а*) близки к 61 и 63 мм$^{-1}$ и составляют примерно 0.9 от частоты Найквиста, равной 71 мм$^{-1}$ (точка *l*), т. е.:

$$R_{1.0} \approx 0.9 N_н. \qquad (25)$$

Разрешающие способности $R_{0.2}$ по контрасту k = 0.2 с учетом и без учета влияния оптической системы (точки d и c) различаются более существенно и соответственно равны 42 и 46 мм$^{-1}$.

Значение ФПМ одиночного пикселя на частоте Найквиста, равной 71 мм$^{-1}$ с учетом и без учета влияния оптической системы (точки f и e) соответственно равны 0.47 и 0.64. Падение значения ФПМ на частоте Найквиста с 0.64 до 0.47 соответствует увеличению размера пикселя с 0.007 мм до 0.0088 мм, т. е. в 1.26 раза (см. выражение (21)). Таким образом, если учесть ранее приведенные данные по сенсору спутника «Ikonos», где это увеличение составляло 1.25 раза, можно принять коэффициент увеличения размера пикселя за счет влияния только дифракционных искажений оптической системы сенсора равным 1.25.

Данный пример и проведенные нами дополнительные исследования позволили получить приближенное выражение для определения зависимости разрешающей способности дискретных систем, ФПМ которых изменяется по закону, близкому к закону $(\sin x)/x$, от контраста объектов k, в виде

$$R_к = R_{1.0}\sqrt[4]{k}. \qquad (26)$$

Это выражение отличается от подобного выражения аналоговых аэрофотосистем [6]

$$R_к = R_{1.0} k^{0.36}. \qquad (27)$$

Таким образом, проведенные исследования и расчеты позволяют предложить для дальнейшего использования следующие приближенные соотношения:

$$N_н = \frac{1}{2 \cdot \Delta}, \qquad (28)$$

$$R_к \approx R_{1.0}\sqrt[4]{k} \approx 0.9 N_н \sqrt[4]{k}. \qquad (29)$$

Выражение (29) получено с учетом выражения (25) и (26).

6. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДИСКРЕТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Есть два подхода к определению разрешения на местности $R_м$ аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками.

Один подход — достаточно распространенный — излагается в известном учебнике В. И. Кравцовой [5]. Этот подход основан на использовании эмпирической формулы

$$R_м = e\sqrt{2}, \qquad (30)$$

где e, м — реальный размер пикселя в плоскости объектов съемки. В выражении (30) в расчет принимается размер диагонали пикселя. Проблема в этом случае заключается в определении реального размера пикселя e, который бы учитывал увеличение размера пикселя за счет влияния факторов, представленных на блок-схеме (рис. 1).

Как было показано выше, влияние дифракционных искажений оптической системы (без учета влияния экранировки центральной части зеркала) увеличивает размер пикселя в 1.25 раза.

При самой оптимистической оценке, влияние всех остальных факторов добавочно увеличивает размер пикселя только в 1.1 раза, поэтому приближенное выражение для реального размера пикселя в плоскости земной поверхности e можно записать в виде

$$e = 1.1 \cdot 1.25 \cdot \Delta \cdot m = 1.375 \cdot \Delta \cdot m, \qquad (31)$$

где Δ, м — размер пикселя фотоприемника в фокальной плоскости; m — знаменатель масштаба съемки.

Подставляя выражение (31) в (30) и учитывая (9), получим

$$R_м = 1.94 \cdot \Delta \cdot m \approx 2 \cdot \Delta \cdot m \approx \frac{2\Delta H}{f}. \qquad (32)$$

Это выражение аналогично выражению (15), т. е. в этом случае разрешение $R_м$ обратно частоте

Найквиста, пересчитанной в плоскость объектов, что является самой жесткой оценкой.

Следует отметить, что использование в работе [5] термина «пиксел» для обозначения реальных размеров проекции элементарного фотоприемника на земную поверхность не совсем корректно. В действительности количество пикселов в системе и угловые размеры каждого из них всегда одни и те же. Увеличение размеров проекции каждого фотоприемника на земную поверхность, обусловленное воздействием оптической системы, сдвигов и других факторов, приводит только к взаимному перекрытию соседних проекций, что приводит к уменьшению контраста изображений мелких деталей. В результате уменьшается разрешающая способность по малому контрасту и соотвественно увеличиваются размеры предельно обнаруживаемых мелких объектов, т. е. ухудшается разрешение на местности.

Выражение (32) справедливо только для компактных объектов высокого контраста и не позволяет оценить влияние контраста объекта на величину $R_м$, а также производить вероятностные оценки полученных результатов.

Второй подход основан на использовании понятия «разрешающая способность» применительно к системам с дискретными фотоприемниками, которое рассмотрено в разд. 5, и вероятностных оценок, рассмотренных в разд. 3.

В этом случае разрешение на местности $R_м$ определяется как величина, обратная значению разрешающей способности, приведенному в плоскость объектов съемки:

$$R_м = \frac{1}{R_к} m = \frac{H}{fR_к}, \qquad (33)$$

где $R_к$, мм$^{-1}$ — разрешающая способность системы в фокальной плоскости по контрасту k; H — высота полета, м; f — фокусное расстояние оптической системы, мм.

Разрешающая способность определяется с использованием выражений (25), (28), (29).

Для учета вероятностных оценок процесса обнаружения и распознавания образов воспользуемся выражением (9) из разд. 3.

Учитывая, что в нашем случае обнаружения малых компактных объектов линейный размер объекта L тождественен нашему пониманию разрешения на местности $R_м$, перепишем выражение (7) в виде

$$R_м = \frac{mB}{2R_к\sqrt{(-\ln p)}}. \qquad (34)$$

Для случая обнаружения малых объектов круглой или квадратной формы, когда не ставится задача распознавания формы этих объектов, коэффициент формы $B \approx 1$ (см. выражение (12)).

Подставляя в (34) значение $R_к$ из (29) и коэффициента $B = 1$, получим

$$R_м = \frac{0.55m}{N_н\sqrt{(-\ln p)}k^{0.5}}. \qquad (35)$$

Используя (11) и (13), получим окончательное общее выражение для определения величины разрешения на местности:

$$R_м = \frac{1.1\Delta H}{f\sqrt{(-\ln p)}k^{0.5}}, \qquad (36)$$

где Δ, мм; f, мм; H, м.

Если принять значение вероятности $p \approx 0.7$ и высокий контраст объекта $k \approx 0.7$, получим простое выражение, удобное для практического использования при оперативных оценках:

$$R_м \approx \frac{2\Delta H}{f}, \qquad (37)$$

где размерность величин аналогична (36).

Выражение (37) практически эквивалентно использованию критерия Найквиста, значение которого пересчитывается в плоскость объектов. Подобные результаты были получены в разд. 4 и 5 (см. (15), (28) и (29)). Выражение (37) отличается от выражений (15), (28) и (29) тем, что при его получении удалось приближенно оценить вероятность полученных результатов. Близкое совпадение результатов, полученных различными методами, свидетельствует об устойчивости и достаточной надежности выражения (32) и общего выражения (35), из которого, как частный случай, получено выражение (37).

Выражение (37) соответствует оценке, учитывающей только значение частоты Найквиста (14), что является предельной оценкой, которая дает минимально возможные размеры разрешаемой детали на местности.

Оценивая величины вероятностных оценок в выражениях (35)—(37), следует иметь в виду, что они получены по методике, аналогичной методике вероятностных оценок аналоговых систем, которые учитывают статистики дешифрирования аналоговых изображений. Экспериментальные материалы по статистическим оценкам дешифровочных свойств дискретных изображений в известной нам литературе практически отсутствуют. При появлении таких материалов численные коэффициенты в выражениях (35)—(37) и соответствующие значения получаемых вероятностей могут быть уточнены. Однако определение выражения (37), как наиболее жесткой (предельной) оценки, при любых вариантах остается справедливым.

Следует отметить, что все предлагаемые в данной методике окончательные выражения дают в некоторой степени оптимистические (завышенные)

оценки величины разрешающей способности и разрешения на местности аэрокосмических систем ДЗЗ с дискретными фотоприемниками, т.к. при их получении в минимальной степени учтено влияние на качество изображения факторов реальной съемки, отраженных в блок-схеме на рис. 1. Полный и более точный учет этих факторов, особенно шумов сенсоров, потребует создания сложных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения [10], а также значительных объемов исходных данных, которые в настоящее время в фирменных каталогах отсутствуют.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования и анализ полученных результатов позволяют рекомендовать для приближенной оценки разрешения на местности ($R_м$) аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками выражение (36). При проведении оперативных оценок можно использовать выражение (37), полученное из (36) при $p = 0.7$ и $k = 0.7$ (высокий контраст объектов). Выражение (37) более информативно, чем непосредственная оценка по критерию Найквиста, так как оно получено при известных значениях контраста объекта и вероятности его обнаружения. Для определения величины разрешения на местности для других значений контраста и вероятности обнаружения необходимо воспользоваться выражением (36).

Выражения (36) и (37) являются приближенными предельными оценками разрешения на местности, так как при их получении не полностью учитывались основные факторы, ухудшающие качество изображений в процессе реальной съемки. Более полный учет влияния этих факторов, особенно влияния атмосферы и шумов оптико-электронных каналов сенсоров, может привести к ухудшению определяемого разрешения на местности и уменьшению соответствующих значений вероятностей обнаружения.

В табл. 2 приводятся оценки величин разрешения на местности для панхроматических каналов сенсоров высокого разрешения спутников IRS-1C, «Ikonos» и «Spot-4», полученные с использованием выражения (37) (исходные данные: вероятность обнаружения $p \approx 0.7$, высокий контраст объектов $k \approx 0.7$).

Таблица 2. Оценки величин разрешения на местности монохроматических сенсоров высокого разрешения спутников IRS-1C, «Ikonos» и «Spot-4»

Спутник	H, м	f, м	Δ, мм	$R_м$, м
IRS-1C	817000	0.98	0.007	11.6
«Ikonos»	681000	10.0	0.012	1.6
«Spot-4»	833000	1.082	0.012	20

1. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование (Термины и определения). ГОСТ-23935-79. — М.: Изд-во стандартов, 1980.—14 с.
2. Живичин А. И., Соколов В. С. Дешифрирование фотографических изображений. — М.: Недра, 1980.—254 с.
3. Кононов В. И. Історія становлення методів оцінки іконічних систем дистанційного зондування стасовно критерію «роздільна здатність» // Cadastre photogrammetry. geoinformatics — modern technologies and development perspectives. — Lviv: National University «Lvivska Polytechnika», October 17-19, 2000, P. 155—159.
4. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — К.: Техніка, 1981.—235 с.
5. Кравцова В. И. Космические методы картографирования. — М.: Изд-во Московского университета, 1995.—240 с.
6. Мельканович А. Ф. Фотографические средства и их эксплуатация. —М.: Изд-во Мин. Обороны СССР, 1984.— 576 с.
7. Проектирование оптических систем. Под ред. Р. Шеннона и Д. Ж. Вайанта. — М.: Мир, 1983.—432 с.
8. Руководство по аэросъемочным работам. Министерство гражданской авиации СССР. — М.: Воздушный транспорт, 1988.—334 с.
9. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. — М.: Гартгеоцентр-Геодезиздат, 1997.—389 с.
10. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // Оптический журнал.—1998.—65, № 2.—Р. 60—63.
11. Фельдбаум А. А. и др. Теоретические основы связи и управления. — М.: Изд-во Физ.-мат. литературы, 1963.—932 с.
12. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. — М.: Мир, 1978.—670 с.
13. Янке Е. Я. и др. Специальные функции. — М.: Наука, 1968.—344 с.
14. Cameras for Indian remote sensing satellite IRS-1C // Current Science.—1996.—70, N 7.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 103—105

К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков

С. А. Станкевич

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Отмечены некоторые недостатки традиционного для аналоговых аэросъемочных систем подхода к оценке разрешающей способности цифровых изображений, а также затронуты аспекты статистического оценивания линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков.

Повсеместное внедрение цифровых технологий в отрасль дистанционного наблюдения [3] приводит к настоятельной необходимости количественного оценивания качества получаемых цифровых изображений. Наличие десятилетиями разрабатываемых, апробированных и выверенных методик оценки качества фотографических изображений способно создать иллюзию возможности адаптации известных методов оценки линейного разрешения на местности к цифровым снимкам без существенной модификации. Однако это не так, и вот почему.

1. Понятие «пространственная разрешающая способность» применима к дискретным системам регистрации изображений в неизменном виде только в случае существенного превосходства разрешения дискретного приемного элемента над разрешением аналоговой части (например, оптики) системы.

2. В этом случае к дискретной системе в полном объеме применим классический аппарат оценки разрешающей способности, основанный на частотном анализе звеньев передачи оптического сигнала. Однако развитие современных технологий изготовления дискретных фотоприемных устройств, в основном полупроводниковых линеек и матриц ПЗС еще не достигло указанного уровня. Кроме того, сама цель выполнения аэрокосмической съемки диктует необходимость работы на предельно возможном для цифровой системы разрешении — порядка размера элемента дискретизации.

3. В случае же превосходства разрешающей способности аналоговой части системы регистрации говорить об увеличении эквивалентного размера элемента дискретизации цифрового изображения [1], как представляется, не совсем корректно с точки зрения физического смысла такого увеличения. При сопоставимых величинах разрешающих способностей использование частотных методов допустимо и оправданно, особенно при решении задач синтеза систем.

4. Речь скорее должна идти об определении порога обнаружимости отдельного элемента дискретизации на фоне других по его радиометрическим характеристикам — светимости, радиационному или оптическому контрасту и т. д. Поэтому при оценке линейного разрешения следует рассматривать не выявление на изображении объектов, размеры которых сопоставимы с геометрической проекцией элемента разрешения на местность, а границ раздела радиометрически однородных полей, шириной заведомо меньшей, нежели отдельный элемент дискретизации.

5. С учетом стохастического характера возможного местоположения объекта регистрации в системе элементов дискретного растра, а также важности шумов полупроводниковых приемников оптического сигнала, представляется логичным использование для оценки качества цифрового снимка классических методов статистического обнаружения детерминированного сигнала на фоне аддитивной гауссовской помехи [7].

Рассмотрим процесс формирования оптического сигнала на элементе разрешения дискретной системы регистрации (рис. 1).

Если облученность объектов наблюдения составляет E_0, а коэффициенты отражения разделяемых полей — ρ_1 и ρ_2, то оптические сигналы E_1 и E_2 на отдельном элементе дискретизации линейного размера a составят

$$E_1 = \rho_1 a^2 E_0, \qquad E_2 = \rho_2 a^2 E_0. \tag{1}$$

Интерес представляет оптический сигнал E_{12} на элементе дискретизации, соответствующем границе раздела полей:

$$E_{12} = [\rho_1 ax + \rho_2 a(a - x)]E_0. \tag{2}$$

Так как местоположение границы раздела на аэроснимке, и следовательно, величина сдвига x являются случайными, определим среднее значение

© С. А. СТАНКЕВИЧ, 2002

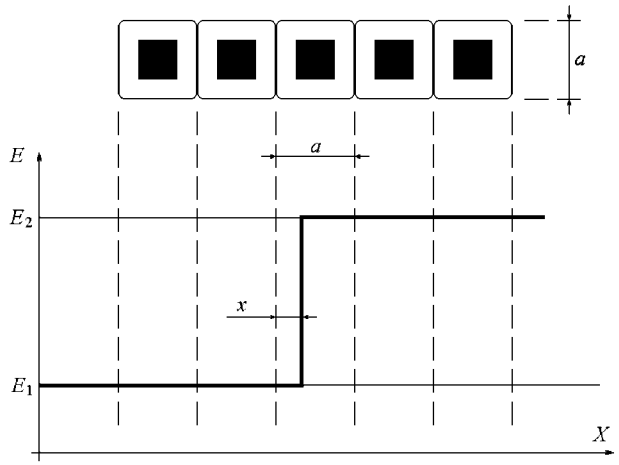


Рис. 1. Формирование оптического сигнала

переходного оптического сигнала E_{12} как

$$E_{12} = \frac{1}{a}\int_0^a E_{12}(x)dx =$$

$$= \frac{1}{a}\int_0^a [\rho_1 ax + \rho_2 a(a-x)]E_0 dx = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}a^2 E_0. \quad (3)$$

Если производится линейное преобразование оптического сигнала E в цифровой код w с коэффициентом преобразования k_w [8], то соответствующие поля цифрового изображения опишутся как

$$w_1 = k_w \tau_0 \rho_1 a^2 E_0, \qquad w_2 = k_w \tau_0 \rho_2 a^2 E_0, \quad (4)$$

где τ_0 — обобщенный коэффициент передачи оптического сигнала от объекта.

Так как в процессе дистанционного наблюдения реальные поля яркости, как правило, обладают стохастической субпиксельной текстурой [9], и на оптический сигнал оказывает влияние множество случайных факторов, справедливым представляется радиометрическое описание полей цифрового изображения нормальными распределениями с математическими ожиданиями w_1 и w_2 и дисперсией σ_w^2, которую можно считать постоянной [5, 6] вследствие незначительности различий между w_1 и w_2 с учетом (3).

Теперь задача разделения полей свелась к статистической проверке гипотез с простой альтернативой, которая в общем случае имеет порог принятия решений $w_{пор}$ вида [2]

$$w_{пор} = \frac{w_1 + w_2}{2} + \frac{\sigma_w^2 \ln\psi}{n(w_2 - w_1)}, \quad (5)$$

где n — объем статистической выборки, а параметр ψ определяется критерием принятия решения (таблица).

Наибольшее практическое применение обычно находят критерии максимума правдоподобия и

Статистический параметр принятия решения

Критерий	Параметр
Байесовский	$\psi = \frac{c_{11} - c_{12}}{c_{22} - c_{21}}\frac{p_1}{p_2}$
Максимума апостериорной вероятности	$\psi = \frac{p_1}{p_2}$
Максимума правдоподобия	$\psi = 1$
Неймана—Пирсона	$P\left\{\frac{f_2(w)}{f_1(w)} \geq \psi\right\} = \alpha$

Примечание. c_{ij} — плата за принятое решение, p_1 и p_2 — априорные вероятности гипотез, α — вероятность ошибки 1 рода («пропуск цели»), β — вероятность ошибки 1 рода («ложная тревога»), $f(\cdot)$ — функция распределения плотности вероятности.

Неймана—Пирсона. Они позволяют по значениям допустимых вероятностей ошибок α и β определить минимально необходимый размер статистической выборки n_{min}.

Для критерия максимального правдоподобия (5) переходит в

$$w_{пор} = \frac{w_1 + w_2}{2}, \quad (6)$$

а вероятности ошибок —

$$\alpha = \beta = 1 - \Phi\left(\frac{w_2 - w_1}{2\sigma_w}\sqrt{n}\right), \quad (7)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-u^2/2}du, \quad (8)$$

— табулированный интеграл Лапласа [4]. Из (7) следует, что

$$\sqrt{n_{min}} = \frac{2\sigma_w}{w_2 - w_1}\Phi^{-1}(1-\alpha). \quad (9)$$

Для критерия Неймана—Пирсона производится раздельный учет заданных допустимых вероятностей ошибок 1 и 2 рода. При этом

$$w_{пор} = w_1 + \frac{\sigma_w \Phi^{-1}(1-\alpha)}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

и

$$\sqrt{n_{min}} = \frac{\sigma_w}{w_2 - w_1}[\Phi^{-1}(1-\alpha) + \Phi^{-1}(1-\beta)]. \quad (11)$$

Для часто использующихся типовых значений $\alpha = 0.05$ и 0.025 $\Phi^{-1}(1-\alpha) \equiv 1.65$ и 1.96 соответственно.

Опыт практической интерпретации цифровых аэрокосмических снимков свидетельствует, что ошибки второго рода встречаются крайне редко и могут не учитываться при оценке качества изображений. По-видимому, это связано с адапционными особенностями зрительного аппарата человека-наблюдателя. Поэтому приемлемым представляется

Рис. 2. Тестовый цифровой космический снимок: а — исходное изображение, б — выделенный фрагмент с увеличением

использование наиболее простого статистического критерия — критерия максимального правдоподобия.

Таким образом, при оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков следует исходить из следующих ограничений:

1. Геометрический размер элемента изображения на местности неизменен и определяется только законами построения изображения и параметрами полета носителя.

2. Система регистрации изображений по своей природе дискретна, т. е. при дешифрировании объектов оперировать возможно только целым числом пикселов. Дополнительного исследования требует влияние шумов дискретизации на форму объектов, размеры которых находятся в области предельных разрешений. В частности, имеются серьезные сомнения в правомерности использования формулы Живичина (или ей подобных), опирающейся на статистические исследования процесса дешифрирования аналоговых фотографических изображений.

3. Минимальная мощность выборки по любому из статистических критериев $n_{\min}$ имеет физический смысл числа связных пикселов объекта, обнаруживаемых на изображении совместно, как единый реальный элемент разрешения цифрового изображения, а величина $a\sqrt{n_{\min}}$ — искомое линейное разрешение цифрового аэрокосмического снимка соответственно.

Процесс обнаружения границы раздела полей цифрового аэрокосмического снимка иллюстрируется рис. 2.

Отношение «сигнал-шум» выбранной области составляет 3.18. Выполненные непосредственно на цифровом изображении измерения дают следующие оценки статистических характеристик:

$$w_1 = 145.05,\ w_2 = 169.53,\ \sigma_w^2 = 59.41.$$

Расчет по формулам (9) и (6) дает приведенное линейное разрешение цифрового аэроснимка $\sqrt{n_{\min}} = 2.47$ пиксела (что неплохо согласуется с визуальной оценкой рис. 2, б) при пороге принятия решения $w_{\text{пор}} = 157.29$.

1. Кононов В. И. Обоснование методики оценки величины разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Радио и связь, 1989.—656 с.
3. Москаленко И. Состояние и ближайшие перспективы рынка ДДЗ // ArcReview: современные геоинформационные технологии.—2001.—№ 2 (17).—С. 4—5.
4. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1982.—344 с.
5. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // Оптический журн.—1998.—**65**, № 2.—С. 60—63.
6. Станкевич С. А. Оценка качества синтезированных цифровых изображений // Информационные технологии в дешифрировании изображений: классификация и оценка эффективности. — Киев: МО Украины, 1995.—С.36—51.
7. Цветков Э. И. Основы теории статистических измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.—256 с.
8. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений: Пер. с нем. — М.: ЭКОМ, 1997.—336 с.
9. Gimelfarb G. L. Gibbs Fields with Multiple Pairwise Interactions in Texture Simulating and Segmenting // Tech. Rep. — Sophia Antipolis: INRIA, 1997.—60 p.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 106—109

Застосування геоінформаційних систем (ГІС) при дешифруванні аерокосмічних зображень

О. А. Порхун

Національна академія оборони України

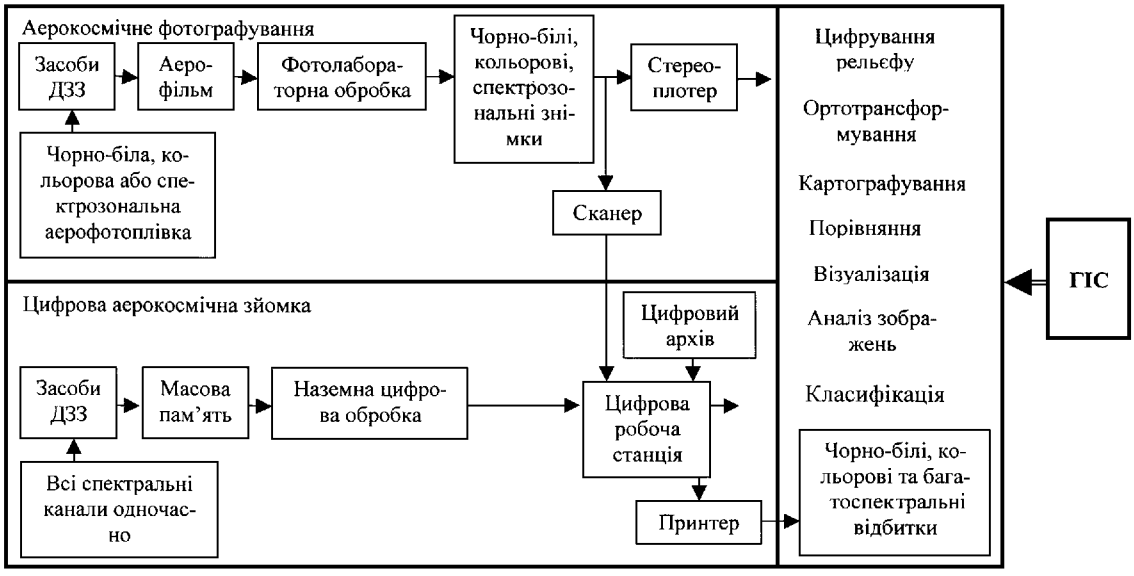
Розвиток технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) набув того етапу, коли повністю цифрові системи вже спроможні витіснити традиційну апаратуру як космічного, так і авіаційного сегментів. Склалися умови для переходу від демонстраційних зразків видових систем до серійних комерційних продуктів, які забезпечують належну якість формування зображень при близькому рівні витрат на зйомку, особливо з урахуванням вартості наземної обробки його матеріалів.

Таким чином, питання переходу до цифрових технологій в області дистанційного зондування сьогодні можна вважати однозначно та позитивно вирішеним. Використання цифрових технологій обробки аерокосмічних знімків дозволяє перейти до повністю або частково цифрового потоку даних дистанційного зондування. Відмінність сучасних технологій цифрової обробки видових матеріалів і традиційної фотографічної обробки з елементами цифрової показано на рисунку [1].

Однією з складових ланок цього технологічного циклу є аналіз даних ДЗЗ — аерокосмічних зображень об'єктів. Аналіз зображень включає дешифрування об'єктів та виконання різних видів вимірювань. Зростання можливостей сучасних ЕОМ обумовило бурхливий розвиток програмного забезпечення для обробки та аналізу матеріалів ДЗЗ. Можна виділити три види програмного забезпечення даного напрямку:

- програми попередньої обробки та тематичного дешифрування зображень;
- програми цифрової фотограмметричної обробки зображень;
- власне геоінформаційні системи (ГІС) та картографічні бази даних.

За визначенням ГІС — це автоматизована система для роботи з графічними та тематичними базами даних, яка виконує функції моделювання та



Технології цифрової обробки матеріалів ДЗЗ

© О. А. ПОРХУН, 2002

розрахунків, створення тематичних карт та атласів для підтримки прийняття рішень та здійснення контролю [2]. Складовими частинами ГІС є: система вводу-виводу, системи управління базами даних (графічних, або просторових та тематичних, або атрибутивних), система перегляду (візуалізації), система обробки та аналізу. Перевагою ГІС, порівняно з іншими видами інформаційних систем, є можливість одночасної обробки в їхньому середовищі як просторової або просторово-прив'язаної (наприклад, про місцевість в районі розташування об'єкта), так і семантичної інформації.

До основних засобів обробки інформації, які є в ГІС, відносяться [2]:

засоби роботи з базами даних,
геометричні та арифметичні утиліти,
мережний аналіз,
виділення об'єктів за просторовими критеріями,
зонування,
засоби моделювання поверхні,
аналіз растрових зображень та спеціалізований аналіз.

Засоби роботи з базами даних, поряд з розповсюдженими (пошук імені поля та його значення, пошук за маскою, створення, редагування та видалення поля), включають в себе особливі — калькуляцію, класифікацію та перегрупування. Калькуляція — це генерація нового значення по полям старих значень баз даних відповідно до введеної формули. Класифікація — генерація нового значення поля по класифікаційних правилах. Прикладом класифікації може служити задача визначення площ дільниць місцевості — великих, середніх та маленьких за чисельним значенням старих полів. Перегрупування — генерація нового значення по групах подібних значень. Наприклад, групувати площі дільниць місцевості з підрахунком загальної площі кожного типу дільниць.

Геометричні утиліти використовуються для аналізу просторових даних та зв'язків між ними. Однією з них є побудова так званої буферної зони — району, межа якого проходить на завданій або обчисленій відстані від межі вихідного об'єкту. До інших геометричних утиліт відносяться перекриття (розпізнавання полігонів, що перекриваються); внутрішні області (розпізнавання полігонів, що цілком лежать в якійсь області); об'єднання полігонів (створення геометричного об'єднання полігонів); визначення лінії перетину; пошук точки торкання лінійного об'єкта; пошук найближчого об'єкта; пошук об'єктів, що потрапили у визначений район; визначення центра прямокутника, що охоплює об'єкт.

До обов'язкових *арифметичних* (картометричних) функцій ГІС відносяться розрахунки площ, довжини та периметрів об'єктів, площ схилів, об'ємів між поверхнями.

ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ДЗЗ

Мережний аналіз дозволяє користувачу аналізувати просторові мережі зв'язних лінійних об'єктів (шляхи, водопроводи, лінії електропередач і т. п.). Звичайно мережний аналіз використовують для визначення найближчого, найвигіднішого шляху, визначення рівня навантаження на мережу, визначення зон впливу на об'єкти мережі інших об'єктів. Типовою задачею мережного аналізу є визначення адреси. З картою шляхів зв'язується файл бази даних з необхідною інформацією. Це дозволяє визначити адресу при вказанні координат та навпаки. З дільницями мережі звичайно зв'язують поняття напрямку руху, дані про який зберігаються в базі даних, зв'язаній з мережею. Іншими даними, що відносяться до мережі, можуть бути потужність потоку, його часові інтервали та ін.

При **виділенні об'єктів за просторовими критеріями** здійснюється пошук в просторовій базі даних об'єктів, що задовольняють заданий критерій або критерії. Знайдені об'єкти можуть переноситися до нового шару, при цьому може бути модифікований зміст старого шару. Водночас коригується зміст старої тематичної бази даних та створюється нова база для нового шару.

Основне призначення функцій **зонування** полягає у побудові нових об'єктів — зон, тобто дільниць територій, однорідних за обраним критерієм або групою критеріїв. Розрахунки проводяться як по одній, так і по групі характеристик і можуть бути узагальнені відповідно до завданих користувачем критеріїв.

Створення **моделей поверхонь** — це створення і моделі побудови ізолінійних зображень, і моделі тривимірної візуалізації, наприклад побудова панорами місцевості в аксонометричній або іншій проекції, побудова профілю і т. д. Розрахунок проводиться за числовими характеристиками, що містяться в базі даних. Моделюватись можуть як зображення реального рельєфу або неперервного поля, сучасного чи з урахуванням динамічних змін, так і уявні поверхні, побудовані за одним або декількома показниками.

При проведенні **аналізу растрових зображень** в ГІС як вхідні дані звичайно використовуються знімки або растеризовані векторні зображення. Знімки, внаслідок їхньої сучасності та достовірності, часто використовують для оцінки динаміки змін шляхом порівняння знімків різної давнини, аналізу просторових взаємозв'язків явищ.

Засоби **спеціалізованого аналізу** призначені для обробки інформації у певній спеціалізованій галузі. Комерційні ГІС можуть забезпечуватися програмними модулями, що підтримують проведення певних видів спеціалізованих аналізів (геологічний,

нафтодобувний, медичний та ін.), однак лише деякі ГІС мають в своєму складі засоби спеціалізованого аналізу. Відсутність такого роду засобів у більшості ГІС пояснюється тим, що організації, які виконують спеціалізовані роботи, намагаються проводити аналіз за власними методиками та правилами. Робота з специфічними даними за спеціальними алгоритмами є характерною рисою цього типу аналізу. Крім того, слід враховувати, що погляди на його проведення з часом можуть змінюватися. Проблема створення засобів спеціалізованого аналізу або спеціалізованих додатків вирішується завдяки «відкритості» більшості ГІС, — тобто можливості адаптування геоінформаційних систем до вирішення конкретної задачі за допомогою спеціальних засобів — мов створення додатків. Мови створення додатків складаються, як правило, з набору команд, подібних командам мови програмування високого рівня, однієї або декількох об'єктних бібліотек, що включають більш складні функції, та компілятора або інтерпретатора, який обробляє команди та файли з текстами програм.

Вище зазначені властивості ГІС дозволяють впроваджувати їх у процес дешифрування аерокосмічних зображень, у тому числі спектрозональних, з метою підвищення його достовірності та усунення протиріччя між значними обсягами даних ДЗЗ і обмеженими можливостями їхньої обробки.

Дешифрування аерокосмічних зображень складається з етапів виявлення, розпізнавання та інтерпретації.

Основну увагу звернемо на можливості використання ГІС при розпізнавані об'єктів на аерокосмічному зображенні, тобто етапі, в процесі якого роздільно сприймаються та аналізуються складові ознаки (елементи, деталі) об'єкта та встановлюється сутність (тип, клас і т. д., в залежності від поставленої задачі) виявленого об'єкта.

Як відомо, всі об'єкти при розміщенні та пересуванні на місцевості та в просторі, а також при функціонуванні згідно зі своїм прямим призначенням виявляють себе низкою ознак, що дозволяють розпізнати ці об'єкти [3]. Розпізнавальні ознаки об'єктів поділяються на прямі та побічні.

Прямі ознаки забезпечують безпосереднє розпізнавання об'єктів. Головною прямою ознакою об'єктів, внаслідок їхньої стабільності та визначеності обрису, є форма (зовнішній контур просторового об'єкта).

Однак при використанні форми об'єктів для їхнього розпізнавання на аерокосмічних (у тому числі спектрозональних) зображеннях виникає низка проблем. Однією з таких проблем є неможливість правильного розпізнавання різних за призначенням об'єктів внаслідок схожості або однаковості їхньої форми. Тому для підвищення достовірності дешифрування необхідно використовувати побічні ознаки, вагомість яких для правильного дешифрування в таких випадках значно підвищується.

До побічних ознак належать відносне розташування об'єктів або приуроченість одних об'єктів до інших, сліди діяльності об'єктів та ін. Однак знайти на знімку побічні ознаки значно складніше ніж прямі, тому при візуальному дешифруванні побічні ознаки можуть широко використовуватися лише дешифрувальниками високої кваліфікації. Внаслідок цього виникає потреба у створенні методик автоматизованого дешифрування, які дозволяли б використовувати як прямі, так і побічні дешифрувальні ознаки.

Однією з таких методик є методика автоматизованого дешифрування об'єктів на основі ГІС-технологій [4]. В цієї методиці використовується модель розпізнавання за Байєсом. Перевагою цієї моделі є те, що вона дозволяє використовувати для дешифрування апріорну, а також різнорідну за своєю природою інформацію (наприклад, морфометричну і семантичну інформацію). При цьому імовірність належності об'єкта до класу розраховується по такій формулі:

$$P(\Omega_m/X_r) = ,$$

$$= \frac{P_0(\Omega_m)P(\Omega_m/T_{\text{імісц.}})P(\Omega_m/T_{\text{ккрут.}})P(\Omega_m/T_{\text{јб/п}})\prod_{n=1}^{M} P(\Omega_m/g_n^r)}{\sum_{l=1}^{M} P_0(\Omega_l)P(\Omega_l/T_{\text{імісц.}})P(\Omega_l/T_{\text{ккрут.}})P(\Omega_l/T_{\text{јб/п}})\prod_{n=1}^{M} P(\Omega_l/g_n^r)} \quad (1)$$

де Ω_m — клас об'єкта, $m = 1, ..., M$; X_r — вектор вимірювань ознак об'єкта r з сукупності об'єктів R; $P(\Omega_m/X_r)$ — апостеріорна умовна імовірність належності об'єкта r до класу Ω_m за даним значенням вектора X_r; $P_0(\Omega_m)$ — апріорна імовірність належності об'єкта до класу Ω_m; $P(\Omega_m/T_{\text{місц.}})$ — умовна імовірність належності об'єкта до класу Ω_m відповідно до типу місцевості (враховується тип грунту та рослинність); $P(\Omega_m/T_{\text{крут}})$ — умовна імовірність належності об'єкта до класу Ω_m відповідно до крутизни схилу; $P(\Omega_m/T_{б/п})$ — умовна імовірність належності об'єкта} до класу Ω_m відповідно до відстані від визначеного району; $P(\Omega_m/g_n)$ — умовна імовірність належності об'єкта до класу Ω_m за значенням коефіцієнта схожості g контуру об'єкта r з відповідним еталоном класу n (визначається за допомогою алгоритмічного забезпечення, описаного в [5]).

Методика включає до себе такі етапи.

1. Визначення множини класів, до яких можуть відноситися об'єкти на зображенні.

2. Розрахунок апостеріорних умовних імовірнос-

тей $P(\Omega_m/T_{місц})$, $P(\Omega_m/T_{крут})$, $P(\Omega_m/T_{б/п})$ та $P(\Omega_m/g_п)$ для визначеної множини класів.

3. Отримання цифрового аерокосмічного зображення та його прив'язка до цифрової карти місцевості в середовищі ГІС.

4. Локалізація об'єкта на зображенні.

5. Визначення за допомогою цифрової карти місцевості характеристик місцевості в районі розташування об'єкту та значень відповідних умовних імовірностей $P(\Omega_m/T_{місц})$ та $P(\Omega_m/T_{крут})$.

6. Визначення значень коефіцієнта схожості g контуру об'єкта з еталонами класів та відповідної умовної імовірності $P(\Omega_m/g_п)$.

7. Визначення значень відстані об'єкта від визначеного району та відповідної умовної імовірності $P(\Omega_m/T_{б/п})$.

8. Розрахунок апостеріорних імовірностей належності об'єкта до класів згідно з формулою (1).

9. Підключення особи, що приймає рішення, для визначення належності об'єкта до певного класу відповідно до значень апостеріорних імовірностей та прийнятого вирішального правила.

На алгоритмічному рівні методика реалізується за допомогою ГІС в інтерактивному (п.п. 2—4, 6, 9) та автоматичному (п.п. 5, 7, 8) режимах.

Методика дозволяє проводити автоматизоване дешифрування аерокосмічних (у тому числі, спектрозональних) зображень об'єктів з залученням як прямих (форма) так і побічних ознак, що значно підвищує його достовірність. Оскільки у методиці використовується просторово прив'язана інформація про об'єкти та місцевість, а найбільш зручним інструментом для обробки такої інформації є геоінформаційні технології, то як середовище реалізації цієї методики доцільно використовувати геоінформаційні системи. Додаток, що реалізує таку методику, буде відноситися до спеціалізованих ГІС-додатків, тому його розробку слід провадити фахівцями у галузі ГІС із залученням фахівців з предметної галузі. Доцільно також передбачити інтегрування такого додатку до складу автоматизованих інформаційних систем (наприклад, автоматизованих систем картографування). Детальніше питання розробки спеціалізованих ГІС-додатків розглянуто в роботі [6].

1. Станкевич С. А., Кононов В. І. Использование материалов дистанционного зондирования Земли для создания пространственных баз данных // Сучасний стан та тенденції розвитку технологій обробки просторових даних: Матер. семінару, Київ, 12—14 березня 2001 р.
2. Филатов Н. Н. Географические информационные системы: Применение ГИС при изучении окружающей среды. — Петрозаводск: КГПУ, 1997.—92 с.
3. Моисеев В. Л., Попов М. А. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков. — Киев: КВВАИУ, 1991.—Ч. 2.—337 с.
4. Порхун О. А. Методика автоматизованого дешифрування аерокосмічних зображень військових об'єктів на основі геоінформаційних технологій // Науково-теоретичні проблеми створення та застосування авіаційних та космічних систем: Матер. наук. конф., Київ, 10—11 квітня 2001 р.
5. Бескровный В. В. О бионическом подходе к классификации объектов на изображении // Информационные технологии в дешифрировании изображений: классификация и оценка эффективности. — Киев: КИ ВВС, 1995.—С. 25—35.
6. Попов М. О., Середінін Є. С., Порхун О. А. ГІС-технології у військових інформаційних системах // Вісник геодезії та карторграфії.—2001.—№ 2(3).—С. 76—79.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 110—115

Сучасні погляди на інтерпретацію даних аерокосмічного дистанційного зондування Землі

М. О. Попов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

З кожним роком неухильно збільшується кількість задач, які успішно вирішуються методами аерокосмічного дистанційного зондування Землі. Серед них дослідження природних ресурсів і явищ, оцінка та передбачення результатів господарчої діяльності, спостереження за станом навколишнього середовища, задачі воєнної безпеки, тощо. Неважко пригадати чимало прикладів успішної реалізації наукових і науково-практичних проектів у галузі дистанційного зондування Землі, які суттєво розширили наше уявлення про природні явища, діяльність людської спільноти, а також прикладів здійснення високорентабельних комерційних проектів.

Проекти такого роду та призначення з зростаючою все інтенсивніше розробляються та успішно впроваджуються у багатьох розвинених країнах. Будь-який проект у галузі аерокосмічного дистанційного зондування надає величезні масиви нових даних, від змісту та якості яких і залежить ефективність самого проекту. Але, якщо говорити глибше, то ефективність проекту визначається тією інформацією, яка може бути потенційно одержана з отриманих даних. Така інформація характеризується певними показниками якості, задоволення яких залежить, в основному, від двох чинників. Перший — дані та їхні внутрішні показники: цінність, достовірність, повнота, обсяг та інші. Другий — досконалість методу інтерпретації даних та його адекватність умовам задачі.

Серед даних аерокосмічного дистанційного зондування Землі особливе місце займають відеодані, або зображення. Тому основна увага у статті приділяється саме аналізу можливостей сучасних методів інтерпретації дистанційних відеоданих та перспективних напрямків їхнього використання.

1. ЕВОЛЮЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Загальну схему інтерпретації даних дистанційного зондування надано на рис. 1. Тут реальний світ — це дійсність з об'єктів, явищ географічної оболонки і т. п. При вивченні або опису дійсності, додержуючись рекомендацій [8], необхідно відрізняти поняття «дані» та «інформація». Інформація — це відомості про реальний світ, що існують в описах, уявленнях фахівців тощо. В залежності від часу їх виникнення вони поділяються на поточні та апріорні й можуть носити як об'єктивний, так й суб'єктивний характер, а також мати різний ступінь достовірності. Дані створюються як безпосередній, первинний продукт дистанційного зондування. Вони, як правило, об'єктивно фіксують поточний стан обмеженої частки дійсності на момент її зондування, а той вторинний продукт, що утворюється внаслідок інтерпретації даних та прийняття відповідних рішень (семантичної обробки), будемо називати поточною інформацією. У процесі інтерпретації даних зондування та створення нової поточної інформації при необхідності залучається відповідна апріорна інформація.

Таким чином, якщо поняття інформації пов'язане зі змістом відомостей про об'єкти і явища реальної дійсності, то поняття даних — з формою відображення (подання) вимірів і спостережень, що отримуються в результаті дистанційного зондування. Зрозуміло, завжди існує деякий оператор зв'язку (відображення) між цими двома поняттями.

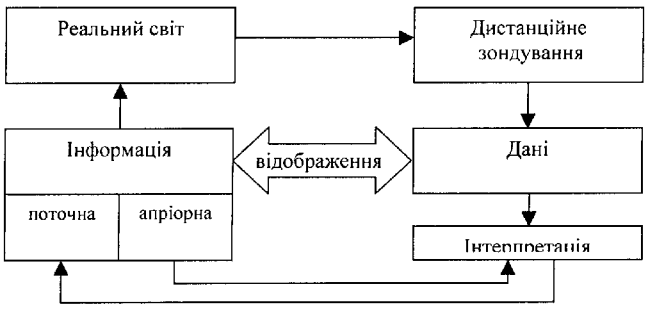


Рис. 1. Загальна схема інтерпретації даних дистанційного зондування

© М. О. ПОПОВ, 2002

Серед даних, що можуть отримуватися методами дистанційного зондування, своєю потенційною інформативністю відрізняються відеодані, або зображення. Зображення може водночас вміщувати інформацію про морфологію і місцеположення природних або штучних об'єктів, їхні геометричні та оптичні характеристики, просторову структуру, а також відомості про властивості місцевості [1, 12]. Але одержання цієї інформації, або інтерпретація зображень — надзвичайно складний процес, ефективність якого залежить, з одного боку, від характеристик відеоданих, а з другого — від способу інтерпретації [12].

До 60-х років минулого століття інтерпретація зображень, здобутих методами дистанційного зондування, здійснювалась виключно людиною, іноді із залученням деяких оптичних або оптико-механічних пристроїв, а для уточнення просторово-географічної, темпоральної та іншої необхідної інформації використовувалися такі додаткові джерела, як карта, довідники та посібники.

Наприкінці 60-х років, коли розпочалося впровадження в дистанційних дослідженнях Землі багатоспектральної фото- та сканерної апаратури, виникла можливість спільної обробки та інтерпретації знімків місцевості, одержаних у різних діапазонах електромагнітного спектру випромінювань (спектральних зонах). Для оптико-геометричного суміщення кількох зональних знімків з метою виявлення додаткової інформації були розроблені і ефективно використовувалися спеціальні прилади синтезу кольорових та псевдокольорових зображень [1, 11, 12].

Тоді ж розроблено технологію оцифровки зображень і вводу їх в ЕОМ [15], а трохи пізніше, на початку 70-х років, почали створюватися електронні сховища даних [2]. Разом це дозволило автоматизувати організацію деяких процесів обробки та інтерпретації зображень. При цьому, звичайно, суттєво полегшилось залучення додаткових даних та тематичної інформації при проведенні інтерпретації знімків дистанційного зондування.

Бурхливий розвиток комп'ютерної техніки та програмних засобів значно полегшив автоматизацію процесів обробки та інтерпретації даних і сприяв підвищенню ефективності систем дистанційного зондування. У якості теоретичного підгрунтя для оцінки ефективності систем автоматизованої обробки та інтерпретації знімків, отриманих методами дистанційного зондування, створення і аналізу таких систем знайшла широке використання розроблена на межі кінця 80-х — початку 90-х років інтерактивна парадигма, сутність якої складається з раціонального розподілу зусиль людини та можливостей ЕОМ при організації роботи зі знімками в умовах обмежень (на достовірність, час інтерпретації тощо). Вона вперше надала можливість при вирішуванні задач створення і аналізу систем автоматизованої обробки та інтерпретації відеоданих дистанційного зондування перейти від емпіричних підходів до науково обгрунтованого методу, в основу якого був покладений спеціально розроблений математичний апарат [12, 13]. На основі інтерактивної парадигми створений ряд нових на той час систем інтерпретаційного призначення, деякі з котрих описані в [9, 10] і пройшли успішну апробацію.

За останні роки у галузі дистанційного зондування Землі склалася ситуація, яка характеризується двома особливостями. По-перше, все значніша увага приділяється комерційному успіху проекту, а це на практиці означає посилення вимог до якості поточної інформації, що отримується шляхом інтерпретації даних зондування. По-друге, суттєво розширилася номенклатура засобів вимірювання та спостереження, які встановлюються останнім часом на повітряні та космічні платформи. Так, наприклад, на космічній орбіті сьогодні працюють системи, які мають понад 200 робочих спектральних каналів, а також прилади, побудовані на нових фізичних принципах [26, 27].

Усунення численних проблем, які породжуються новою ситуацією, за допомогою інтерактивної парадигми у формі, представленій в [12, 13], зустрічає певні складнощі, які обумовлюються, насамперед, такими недоліками останньої. По-перше, методологія [12, 13] передбачає використання вихідних даних виключно у формі зображень, тобто інтерпретація параметричних даних тут не передбачена. По-друге, — і це головне, — дана методологія не враховує певної неоднозначності інтерпретаційних факторів та динаміки пізнавальних процесів на формування проміжних та остаточних інформаційних рішень.

Тому йдеться про пошук підходу, який дозволяв би ефективно вирішувати проблеми, що породжуються новою ситуацією у дистанційному зондуванні Землі. Фахівці збігаються у думці, що такий підхід повинен базуватися на використанні нової, синергетичної парадигми [7, 19]. Синергетика — наука, яка вивчає самоорганізовані системи та багатокомпонентні кооперативні процеси [14, 5]. Вивчення базується на таких засадах: 1) спільність предмета аналізу, причому наголос здійснюється на внутрішніх властивостях як на джерелі саморозвитку; 2) прагматичне відношення до системи «ціле — частка», а саме розуміння, що хоча концепції редукціонізму і холізму [6]) (відповідно можливість або неможливість розкласти ціле на частки) з філософської точки зору є полярними, тобто виключають одна одну, проте з конструктивної точки зору кожна з них окремо чи обидві разом у

тонкому балансі можуть бути корисними при дослідженні системи, вибір залежить від цілей і необхідного рівня опису системи; 3) виваженість всіх дій та рішень стосовно природних закономірностей, зокрема обов'язкове врахування фізики процесів; 4) стратегія дій та приймання рішень повинна бути дуже обережною і водночас швидко пристосовуватися щодо будь-яких змін у часі-просторі.

Якщо на поточний час концептуальні засади синергетики більш-менш сформовані, то її методичне забезпечення ще тільки утворюється. Проте вже ясно, що синергетичний підхід дозволяє ефективно вивчати та моделювати природу несталих (неоднозначних) процесів та еволюційну динаміку складних систем, а саме до цього класу належать системи формування, обробки, інтерпретації зображень та прийняття інформаційних рішень.

В дистанційних дослідженнях до синергетичних відносять методи та методики спільної комплексної (у тому числі багаторівневої) обробки й інтерпретації багатоспектральних даних, які можуть відрізнятися між собою способом формування або подання, мати різне фізичне походження тощо. Саме синергетичний підхід покладений в основу побудови найсучасніших систем і технологій дистанційного зондування Землі, а серед них найвідомішою є Data Fusion Technology, або технологія злиття даних [7, 19, 25].

До технології злиття даних звертаються насамперед тоді, коли система, що вивчається методом дистанційного зондування, є слабкоструктурованою й, до того ж, змінюється з часом (певним чином еволюціонує), а дистанційні дані гомоморфні щодо дійсності й характеризуються високою кумулятивністю і асоціативністю. При цьому слабкоструктурованість означає, що зв'язки між складовими елементами системи жорстко не фіксовані. Кумулятивність даних — це їхня властивість досить повно відображати дійсність. [3]. Гомоморфізм даних — технічна складова кумулятивності — означає, що вони відображають дійсність за принципом «багато — в одному». Асоціативність свідчить про здатність даних породжувати у інтерпретатора деякі здогадки (неявні розуміння, міркування) про прямі або побічні зв'язки між певними елементами системи, процесів, явищ тощо.

2. ЗЛИТТЯ ДАНИХ У ДИСТАНЦІЙНОМУ ЗОНДУВАННІ

Згідно з роботами [19, 28] злиття даних визначається як формалізована концептуальна схема спільного використання різних засобів, методичних прийомів, іншого інструментарію для поєднання даних з різних джерел і виявлення їхньої синергетики з метою одержання інформації, котра іншими шляхами не одержується. Технологія злиття даних у дистанційному зондуванні виключає будь-які обмеження на форму подання вихідних даних, кількість і фізичну природу їх джерел, а об'єкти вивчення та середовище їхнього існування розглядаються тут з єдиної точки зору та з урахуванням взаємного впливу, динаміки і можливої самоорганізації процесів.

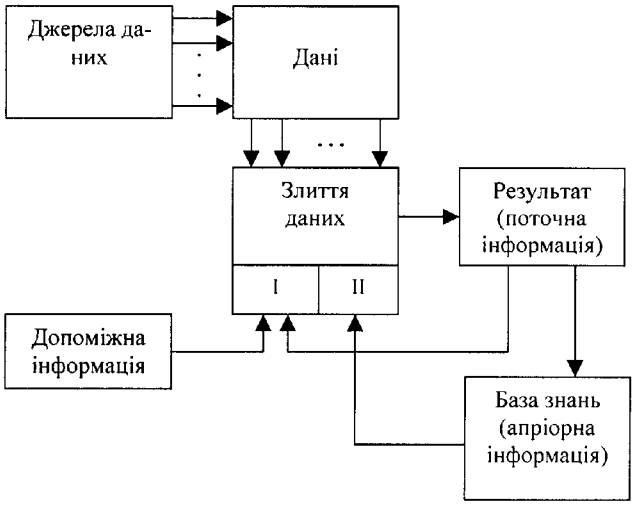


Рис. 2. Загальна схема організації злиття даних

Загальна схема організації злиття даних подана на рис. 2. Згідно з цією схемою при злитті даних використовуються три зовнішніх компоненти: джерела даних, допоміжна інформація та база знань.

Таким чином, в основі злиття даних — комбінування даних та інформації. Звернемо увагу на наявність на рис. 2 зворотної петлі від результату (поточної інформації) до блоку, де здійснюється злиття даних. Це означає, що алгоритмічно процес злиття даних матиме ітеративний характер.

До першого і головного при здійсненні злиття даних компонента належать джерела даних — фотообладнання, інфрачервоні сенсори, радіолокатори, магнітометри та інша апаратура, яка може бути задіяна для зондування. Другий компонент — допоміжна інформація; вона може бути різноманітною: тактико-технічні характеристики апаратури зондування, дані її калібровки, польотні умови виконання зйомки, службові дані і т. п. Третій компонент — база знань, яка є основним постачальником апріорної інформації. Апріорна інформація використовується при управлінні процесом злиття даних, для розуміння фізичних, просторово-часових та інших обмежень на умови протікання процесів тощо. Зокрема, апріорну інформацію тематично-просторового характеру може надавати за-

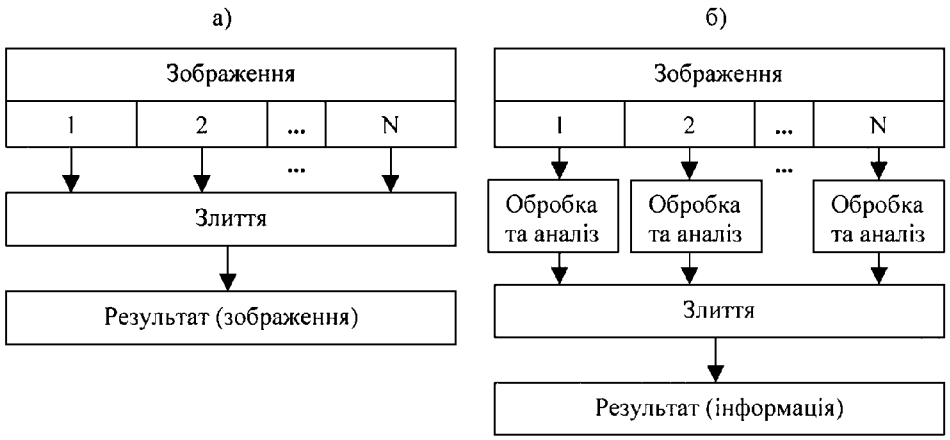


Рис. 3. Організація злиття даних на різних рівнях подання зображень

лучена до бази знань сучасна геоінформаційна система.

Злиття даних за своїми цілями може поділятися на фільтрацію певних сигналів, виявлення об'єктів та явищ, їхнє розпізнавання, встановлення ступеня вірогідності, передбачення яких-небудь процесів тощо. Саме ціль визначає, який підхід раціональніше використовувати при організації злиття даних.

У дистанційному зондуванні вирізняють етапи формування сигналу, його попередньої обробки й змістовної (семантичної) обробки [20]. Кожному етапу відповідає свій рівень подання (опису) даних і впровадження технології злиття даних.

Наприклад, якщо звернутися до дискретних (цифрових) зображень, базовим сигнальним елементом яких є піксел, то при наявності декількох первинних зображень загальною чисельністю N злиття на першому рівні та формування результату у вигляді одного узагальненого зображення здійснюється шляхом ототожнення і поєднання відповідних пікселів первинних зображень, як це показано на рис. 3, *а*. В результаті поєднання пікселів може утворюватися монохроматичне зображення з новими статистичними властивостями або зображення відповідної кольорової палітри.

Метою попередньої обробки зображень буває їх попіксельне коригування або підкреслення деяких властивостей та ознак, тобто перетворення зображення за формою подання відеоданих. Змістовна обробка зображення пов'язана із розпізнаванням об'єктів та прийняттям інформаційних рішень. У одному випадку зливаються властивості та ознаки, у іншому — інформаційні рішення, але процес злиття на другому та третьому рівнях його впровадження організується за одною схемою (рис. 3, *б*).

Хоча, як вже відмічалося вище, у технології злиття даних нема обмежень на кількість джерел даних, за різними причинами (електромагнітна несумісність, енергетичні витрати, вагові обмеження тощо) всі існуючі джерела не завжди можуть бути одночасно разом використані для аерокосмічного дистанційного зондування Землі. Тому виникає задача формування оптимального складу комплексу засобів зондування. Така задача вирішується у рамках так званого підходу «активного злиття даних», який запропоновано останнім часом [24]. Цей підхід передбачає використання механізму селекції найінформативніших джерел даних, для чого створюється спеціалізована експертна система, база знань якої наповнюється інформацією про джерела дистанційних даних, вимоги та умови обробки даних, а також правила поєднання (комбінування) даних та рішень. Особливо плідним може виявитися впровадження підходу при інтерпретації багатозональних (гіперспектральних) зображень, а також даних різної фізичної природи.

Ключова проблема злиття даних — формалізація правил комбінування і узагальнення інформації, насамперед комбінування інформаційних рішень. З цією метою розглядаються ймовірнісна модель Байеса, нечітка логіка та мережевий підхід [4, 16, 24]. Найпростіша серед них модель Байеса, але вона потребує знання статистики даних і величезних обсягів вимірювань та спостережень, які у практиці дистанційного зондування дуже важко отримати. Тому при малих вибірках даних та їхній невизначеності все частіше перевагу віддають методам нечіткої логіки, що базується на теорії нечітких множин [4]. На відміну від першої моделі тут при інтерпретації можна враховувати та оцінювати ситуації, коли взагалі немає жодних відомостей про значення ймовірностей. На заміну відсутнім відо-

мостям при здійсненні нечітких міркувань використовують прозорі поняття міри довіри та недовіри. Найдосконалішим у нечіткій логіці є підхід по Демпстеру—Шаферу, який дозволяє маніпулювати як з нечіткою, так і з неточною або випадково проявленою інформацією.

Окреме місце займає мережевий підхід, сутність якого у тому, що дані, які формуються при зондуванні, подаються до мережі, де вони обробляються за законами, обумовленими структурою мережі і характеристиками її елементів. Якщо елементи однотипні, а зв'язки між ними (принаймні на початку функціонування мережі) випадкові, то таку мережу класифікують як нейронну. Якщо структура мережі детермінована, а структурні елементи розподіляються за своїм функціональним призначенням, і хоча б деякі з них здатні здійснювати змістовну обробку даних, то таку мережу класифікують як семантичну.

Проведений огляд свідчить, що злиття даних як новітній спосіб обробки та інтерпретації даних дистанційного зондування має свою концепцію, загальну схему організації злиття даних, на базі якої створено схеми організації злиття на різних рівнях подання даних, а також деякий технологічний інструментарій. Все це обумовило успішне використання даної технології вже на етапі її становлення. Визначимо та проаналізуємо деякі напрямки її впровадження в аерокосмічному дистанційному зондуванні Землі.

3. НАПРЯМКИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗЛИТТЯ ДАНИХ В АЕРОКОСМІЧНОМУ ДИСТАНЦІЙНОМУ ЗОНДУВАННІ

При всіх її перевагах технологію злиття даних важко віднести до простих та дешевих, оскільки вона потребує належного технічного і алгоритмічного забезпечення, а також залучення висококваліфікованих фахівців. Це обумовлює магістральний напрям її використання в аерокосмічному дистанційному зондуванні Землі: інтерпретація даних різної фізичної природи та якості при нестаціонарності об'єктів, процесів і явищ, що дистанційно вивчаються, відсутності їхніх надійних моделей, невизначеності та малого обсягу апріорної інформації.

Серед основних напрямків, де плідно впроваджується дистанційне зондування, і при цьому інтерпретація результатів здійснюється за технологією злиття даних, — сільське господарство та лісозберігання [19, 21], пошук природних копалин [17], землекористування [25], картоскладання та міське проектування [24], надзвичайні ситуації [19, 22], виявлення та розпізнавання військових об'єктів і воєнної загрози [18, 23].

Для систем інтерпретації зображень зі злиттям даних першого або другого рівнів подання розроблені ефективні алгоритми кольорових перетворень, обчислювання головних компонентів, статистичної фільтрації тощо [25]. При злитті даних на третьому рівні подання широко використовуються алгоритми автоматичного виявлення та розпізнавання образів, методи семантичного аналізу зображень та прийняття інформаційних рішень [19].

Досвід впровадження свідчить, що кращі результати досягаються при спільному використанні багатозональних знімків (зроблених у видимій та інфрачервоній областях електромагнітного спектру) і даних радіолокаційного зондування. Хоча слід відмітити, що є проблема об'єктивної оцінки ефективності впровадження. Очевидно, найбільшу перспективу має критеріальний підхід до оцінки ефективності аерокосмічного дистанційного зондування Землі, який базується на оцінці корисності здобутої інформації.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано існуючі погляди на інтерпретацію даних дистанційного зондування Землі та показано, що на сучасному етапі найкращі результати можуть бути досягнуті з використанням технології злиття даних, концептуальною основою якої є синергетична парадигма. Розглянуті схеми організації обробки даних на різних рівнях їх подання, а також деякі моделі комбінування і узагальнення інформації. Наведено чисельні приклади практичного впровадження нової технології.

Подальше удосконалення технології злиття даних пов'язане з такими напрямками, як розвиток концептуально-методологічних засад; розробка механізмів виявлення знань про цільову предметну область дистанційного зондування та способів формалізації опису об'єктів, що її складають; створення алгоритмічного та програмного забезпечення для вирішування сьогоденних і перспективних наукових та практичних задач.

1. Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1983.—374 с.
2. Буров К. Обнаружение знаний в хранилищах данных // Открытые системы.—1999.—№ 5-6.—С. 67—77.
3. Дружинин Г. В., Сергеева И. В. Качество информации. — М.: Радио и связь, 1990.—С. 14—15.
4. Змитрович А. И. Интеллектуальные информационные системы. — Минск: ТетраСистемс, 1997.—368 с.
5. Кальоти Дж. От восприятия к мысли: О динамике неоднозначного и нарушениях симметрии в науке и искусстве. — М.: Мир, 1998.—221 с.
6. Клир Дж. Системология: Автоматизация решения системных задач. — М.: Радио и связь, 1990.—С. 194—199.
7. Ляльо В. І. Сучасний стан космічного землезнавства і

перспективи його розвитку // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Киев: НАН України, 1999.— С. 6—18.
8. Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. — М.: Мир, 1980.—662 с.
9. Патент RU № 2075780, МПК G 06 K 9/56. Способ тематического дешифрирования изображений и устройство для его осуществления / М. А. Попов, Ю. И. Гунько, С. А. Станкевич. — Опубл. 20.03.97.
10. Патент RU № 2144654, МПК G 01C 11/00. Способ измерения разрешения на местности оптико-электронной системы дистанционного зондирования / М. А. Попов, С. Ю. Марков, С. В. Балашов. — Опубл. 19.07.99.
11. Попов М. А. Формирование псевдоцветного изображения при комплексном дешифрировании аэроснимков // Тр. КВВАИУ.—1989.—Вып. 8.—С. 24—28.
12. Попов М. А., Моисеев В. Л. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков. — М.: МО СССР, 1991.—Ч. 1.—248 с.
13. Попов М. О. Системологія інтерактивної обробки та розпізнавання зображень, здобутих при дистанційному зондуванні // Пр. 1-ї Всеукраїнської конф. «УкрОБРАЗ-92», Київ, 17—21 листопада 1992 р.
14. Хакен Г. Информация и организация: Макроскопический подход к сложным системам. — М.: Мир, 1991.—240 с.
15. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Сов. радио, 1979.—312 с.
16. Clement V., Giraudon G., Houzelle S., Sandakly F. Interpretation of Remotely Sensed Images in a Context of Multisensor Fusion using a Multi-specialist Architecture. — http://iris.usc.edu/vision-notes/bibliography/match-p1457.html.
17. Dasarathy B. V. Sensor Fusion Potential Exploitation — Innovative Architectures and Illustrative Applications // Proc. IEEE Special Issue on Sensor Fusion.—1997.—**85**, N 1.—P. 24—38.
18. Duvoisin H. A., III, et al. Multi-sensor system for mine detection // Proc. SPIE.—1998.—**3436**.—P. 705—716.
19. Future Trends in Remote Sensing // Proc. of 17th EARSeL Simp. on Future Trends in Remote Sensing, Lyngby, Denmark, 17—19 June 1997 / Ed. by P. Gudmansen. — Rotterdam, Blookfield, 1998.—477 p.
20. Lillesand T. M., Kiefler R. W. Remote Sensing and image interpretation. N. Y. John Wiley@Sons, Inc., 3ed, P. 51—87.
21. Lozano-Garsia D. F., Hoffer R. M. Sinenergeticeffects of combinated Landsat-TM and SIR-B data for forest assesment // Remote Sensing.—1993.—**14**, N 5.—P. 2677—2694.
22. Lyalko V. I., et al. Assesment of the development of the enviroment using multi-temporal satellite data for Chernobil disaster area // EARSeL Symp. Operation Remote Sensing for Sustainable Development, Enschede, Netherlands, 11—14 May, 1998.
23. McDaniel R. V., et. al. Image fusion for tactical applications // Proc. SPIE.—1998.—**3436**.—P. 685—695.
24. Pinz A., Prantl M., Ganster H. Active Fusion — A New Method Applied to Remote Sensing Image Interpretation. — http://citeseer.nj.nec.com/20999html.
25. Pohl C., van Genderen J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // Remote Sensing.—1998.—**19**, N 5.—P. 823—854.
26. Geoinformation Technologies for Territorial Development Management: Proc. IV Internat. Conf., Yalta, Ukraine, May 28—June 1, 2001.
27. Space imagine Europe http: // .www.si — eu.com.
28. Wald L. A European proposal for terms of reference in data fusion // Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.—1998.—**32**.—P. 651—654.

Опыт применения спутниковой интерферометрии в комплексе методов ДЗЗ

Ю. В. Костюченко

Центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук НАН Украины, Киев

ВВЕДЕНИЕ

История развития методов ДЗЗ последнего десятилетия позволяет утверждать, что спутниковая интерферометрия является одной из наиболее высокотехнологичных отраслей дистанционного зондирования. Радиолокаторы бокового обзора, установленные на спутниках серии ERS, JERS и RADARSAT, позволяют записывать не только амплитуду, но и фазу отраженного поверхностью радиосигнала. Анализ этой характеристики при совместной обработке двух радиолокационных изображений, полученных при соответствующих условиях (в зависимости от типа решаемой задачи выбирается оптимальный временной интервал между съемками и базовая линия — расположение сенсоров), позволяет получать информацию о высоте подстилающей поверхности.

Таким образом, эта технология дает возможность получать цифровые модели рельефа и данные о вертикальных движениях земной поверхности. Описанный подход нашел самое широкое применение при решении мониторинговых задач. В частности, цифровые модели рельефа с успехом применяются в рамках ГИС-технологий, а оперативный мониторинг малых вертикальных движений земной поверхности является ключевым элементом методик оценки природных и техногенных рисков.

© Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, 2002

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Радарная интерферометрия — это специальная технология, которая предназначена для получения информации о состоянии земной поверхности по фазовому сдвигу между сигналами, получаемыми при разных пространственных или временных положениях спутника. Фазовый сдвиг напрямую зависит от разницы положений соседних точек (элементов разрешения) на местности и разницы положений спутников или антенн в пространстве. Если позиции антенн известны точно, то разница фаз, соответствующая разному положению двух точек на местности, может быть определена с точностью, которая будет зависеть от характера рельефа и от взаимного положения антенн в пространстве.

Радиолокаторы бокового обзора с синтезированной апертурой (SAR — Synthetic Aperture Radar) позволяют картировать протяженные полосы на земной поверхности шириной в несколько десятков километров, производя измерения амплитуды и фазы отраженного сигнала от элементов поверхности с разрешением около 10 метров.

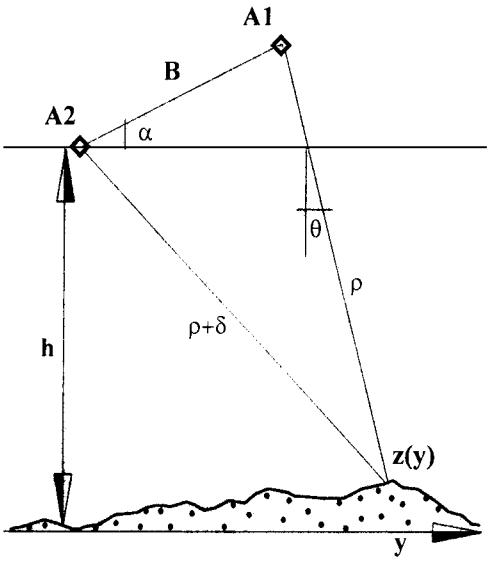
Такие системы, установленные на спутниках серии ERS, JERS и RADARSAT, позволяют записывать не только амплитуду, но и фазу отраженного поверхностью радиосигнала. Фаза одного комплексного SAR-снимка, который называется SLCI (Single Look Complex Image) не имеет практического применения. Только два SAR-SLCI-снимка полученные с разных точек в пространстве и их взаимный фазовый сдвиг могут быть использованы для построения цифровых моделей рельефа (Digital Elevation Model — DEM) и мониторинга малых вертикальных движений земной поверхности [1—16]. Цветокодированное изображение разницы фаз двух SLCI-снимков, которое называется интерферограммой, рассчитывается как произведение комплексного значения пикселя одного снимка на комплексно сопряженное значение другого снимка, при этом оба снимка предварительно очень точно привязываются друг к другу по специальному алгоритму [20].

Рассмотрим в несколько упрощенном виде схему получения SLCI-изображения. Пусть две радарные системы наблюдают некоторый участок земной поверхности с двух позиций A1 и A2 (рис. 1).

Радиолокационный сигнал посылается от A1 и принимается одновременно на A1 и A2. Разница фаз двух принимаемых сигналов пропорциональна разнице пройденного ими пути длиной δ, которое зависит от длины базы B, базового угла α, угла обзора θ, полной длины пути ρ, высоты h и высоты положения (топографии) точки $z(y)$. Расстояние δ может быть выражено, по простым геометрическим соображениям, следующим образом [1—4]:

$$\delta = \lambda\varphi/(2\pi), \qquad (1)$$

где φ — измеренная фаза, а λ — длина волны.



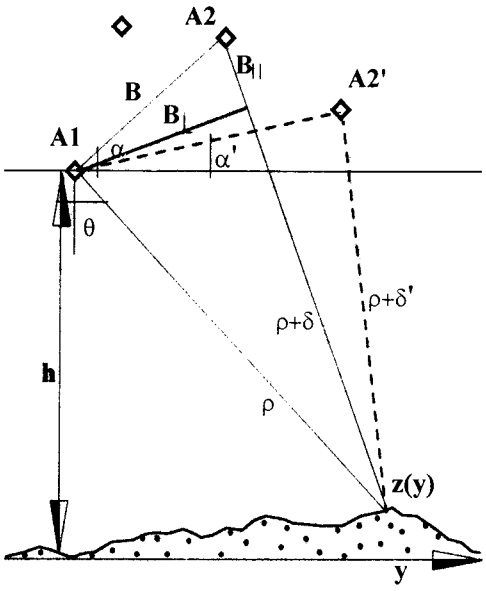


Рис. 1. Схема получения SLCI-изображения радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой спутникового базирования

Рис. 2. Схема получения SLCI-изображения радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой спутникового базирования для измерения полей малых вертикальных смещения земной поверхности

Закон косинусов позволяет получить соотношения

$$\sin(\alpha - \theta) = -\frac{(\rho + \delta)^2 - \rho^2 - B^2}{2\rho B}, \quad (2)$$

$$z(y) = h - \rho\cos\alpha\cos(\alpha - \theta) - \rho\sin\alpha\sin(\alpha - \theta). \quad (3)$$

Таким образом, фиксируя фазы пришедших сигналов в каждой точке изображения и используя приведенные уравнения, можно получить топографическую высоту (рельеф) для каждой точки. Ошибка при определении рельефа по такой схеме оказывается лежащей в пределах 5—12 % от измеренного значения и в основном зависит от точности измерения базовых параметров: угла обзора θ и высоты ρ [1—6].

Описанная схема является классической и широко используется для получения рельефа местности — построении DEM. Рассмотрим теперь принципы детектирования малых вертикальных движений земной поверхности.

Так называемая «повторная» интерферометрия, когда между получаемыми данными (SLCI) проходит какое-то время, имеет большое значение для измерения земных просадок и других возможных изменений земной поверхности. Если SAR-SLCI-данные получены не одновременно, то фазовый сдвиг или интерферограмма будет нести в себе информацию не только о рельефе, но также о возможных изменениях земной поверхности за время между получением SAR-SLCI-данных. Изменение земной поверхности во времени может привести к потере когерентности на интерферограмме при случайном характере изменения поверхности или к дополнительному фазовому сдвигу при наличии просадок поверхности вследствие шахтных выработок. Схема наблюдения для нашего случая представлена на рис. 2.

Выражение для интерферометрического сдвига фазы можно записать в виде [2—18]

$$\Delta\varphi_T = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta(\Delta r_0) = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r_0}. \quad (4)$$

Здесь λ — длина волны, r_0 — расстояние от антенны до элемента разрешения на земной поверхности, B_n — перпендикулярная базовая линия; n_p — разница по высоте между соседними элементами разрешения на поверхности (относительное смещение в вертикальной плоскости).

Случайное изменение положения или физических свойств (влажность в почве) элементов на местности определяется как область низкой когерентности и исключается из рассмотрения. В формуле (4) $\Delta\varphi_T$ представляет собой фазовый сдвиг между соседними пикселями вследствие разницы их положения по высоте. Если же между получением SAR-SLCI-данных прошло время, и в течение этого времени положение земной поверхности изменялось последовательно (не случайным образом), то к фазовому сдвигу $\Delta\varphi_T$ добавится фазовый сдвиг $\Delta\varphi_s$, который и будет обусловлен этими подвижками земной поверхности. Относительное небольшое, порядка сантиметра, изменение положения точки относительно наклонной дальности приводит к существенному изменению фазы на интерферограмме. Фазовый сдвиг $\Delta\varphi_s$ пропорционален отношению между относительным смещением элемента разрешения Δs и длиной волны радиолокационного сигнала λ.

Таким образом, если мы имеем не одновременную интерферометрическую пару с заданной базовой линией B_n и небольшими подвижками земной поверхности между датами получения данных, то уравнение (4) можно переписать в виде [2—6]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_T + \Delta\varphi_s = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r_0} + \frac{2\Delta s}{\lambda}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно что, $\Delta\varphi_T$ и $\Delta\varphi_s$ нужно разделить с целью выявления подвижек земной поверхности. Для того чтобы исключить влияние топографии, можно сравнивать две интерферограммы одного и того же участка местности, которые были получены в разное время с помощью «тандем-пар». При этом разница фаз этих двух интерферограмм будет иметь вклад, обусловленный только составляющей $\Delta\varphi_s$, поскольку вклад от $\Delta\varphi_T$ будет компенсирован [14—18]. Более легкий путь для оценки подвижек состоит в выборе таких интерферометрических пар, базовая линия которых будет очень мала, порядка нескольких метров, или равна нулю в идеале [2—7, 15—18]. Такие малые базовые линии позволяют пренебречь влиянием рельефа местности. На таких интерферограммах изменение фазы на один полный период будет соответствовать сдвигу элемента разрешения земной поверхности на половину длины волны зондирующего радарного сигнала в направлении наклонной дальности [6—8]. Для спутников ERS эта величина соответствует изменению положения поверхности на 3 см в направлении, перпендикулярном линии обзора [9—8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

На протяжении 1998—2001 гг. Центром аэрокосмических исследований Земли совместно с Европейским космическим агентством были реализованы

два проекта, направленных на использование данных спутниковой радиоинтерферометрии для детектирования малых вертикальных движений земной поверхности. Первый проект был посвящен проблемам экологической безопасности: были оценены движения поверхности в районе Чернобыльской АЭС, в частности защитных сооружений над разрушенным реактором, по данным многолетних наблюдений. Второй проект имел своей целью оценку техногенных рисков в угледобывающих регионах Украины, а именно — была оценена величина проседания поверхности над угольными шахтами.

Если первый проект, посвященный исследованию зоны Чернобыльской АЭС, носил в большей степени учебный характер, и результаты, полученные по его итогам не выявили сколько-нибудь значительных изменений земной поверхности, то исследование поверхности над шахтными выработками позволило получить важные и интересные результаты. Рассмотрим их подробно.

Для обработки по описанному выше алгоритму было использовано 14 изображений со спутника ERS-1 и ERS-2 в течение 1991—1999 гг. Из этих изображений было составлено 12 пар, из которых 4 оказались пригодными для обработки с учетом природных, технологических и метеорологических условий. Для интерферометрической обработки использовалась специально разработанная программа EarthView InSAR версии 1.2 [20]. В дополнение к этому для обработки многозональных снимков видимого диапазона и создания трехмерной модели местности на основе комбинации результатов InSAR-обработки со снимками видимого диапазона использовались программы Atlantis EarthView версии 4.4.1 и «ERDAS Imagine» версии 8.4.

Для выбранного района была построена цифровая модель местности (DEM). DEM была необходима для того, чтобы убрать влияние топографии на фазу при разностной интерферометрической обработке. Полученное изображение когерентности дало некоторые положительные результаты на определенной области вне лесных массивов с влажностью в почве меньше 10 %. На рис. 3—5 представлены результаты создания DEM.

Также для изучаемого района была проведена разностная InSAR-обработка. Ввиду низкой когерентности лесных массивов и заболоченных земель разностная обработка была проведена только по двум парам. Полученное изображение когерентности дало хороший результат только в областях без плотного растительного покрова.

Некоторые цветовые признаки на этом изображении могут быть распознаны как относящиеся к просадкам земной поверхности в области угольных шахт. Рис. 7, 8 показывают часть интерферограммы, соответствующую области угольных шахт (область шахт выделена прямоугольными областями на карте региона и на интерферограмме). Выделенная область на карте и на интерферограмме соответствует городам Стаханов, Брянка и Алчевск.

Часть интерферограммы, на которой наблюдаются участки сплошного цвета, была проанализирована и охарактеризована как территория с просадками от 1.5 до 2.5 см. Эти участки совпадают с расположением угольных шахт. Центральная часть участков угольных шахт имеет низкую когерентность (сказывается влияние промышленных и жилых строений), и поэтому на интерферограмме сплошные участки определенного цвета прерываются точечно-зашумленными участками разных цветов.

В настоящем исследовании для подтверждения полученных результатов используются материалы работ по определению величины просадки поверхности над шахтными выработками, выполненные в период с 1990 по 2000 гг. на базе Украинского государственного геолого-разведочного института Департамента геологии Министерства экологии и минеральных ресурсов Украины. Специалисты ЦАКИЗ провели калибровку этих данных в 2000 г. на основе результатов полевых исследований и геологического моделирования.

Анализируя результаты проведенных наземных исследований, был оценен коэффициент просадок поверхности (отношение величины просадок к общей извлекаемой мощности разрабатываемых угольных пластов), который варьировался от 0.5 до 0.9, при среднем значении 0.7. По результатам интерферометрической обработки, а также, принимая во внимание сложность геологического строения исследуемой территории и техногенные факторы, коэффициент просадок составил 0.55—0.65 (за 1995—1998 гг.).

Результаты этих исследований показали широкие возможности применения спутниковой интерферометрии для решения таких задач, позволили адаптировать применяемые методики к условиям Украины, получить заключения об экологической безопасности исследуемых территорий, дали возможность прогнозировать развитие опасных ситуаций.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ: ПОТЕНЦИАЛ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДОВ ДЗЗ

Результаты этой работы показали, что ERS-SAR-данные могут быть успешно использованы для определения небольших подвижек земной поверхности вокруг и внутри промышленных районов, в частности Донбасса.

Рис. 3. Изображение ERS-1, 27.06.95; изображение ERS-2, 23.05.95; изображение когерентности; интерферограмма

Рис. 4. Изображение DEM, текстурированное снимком

Рис. 5. Другой вид DEM в композиции с «Landsat TM» (10.09.86)

Рис. 6. Изображение разностной (DIFF) интерферограммы

Рис. 7. Карта региона с указанием участков угольных шахт

Рис. 8. Участок на интерферограмме, который соответствует областям угольных шахт

Для того чтобы получить более достоверные результаты, необходимо продолжить исследования. Все полученные результаты необходимо в дальнейшем подтвердить и проверить с использованием информации о тектонике, геоморфологии, а также с привлечением тематических карт, воздушных фотографических методов и более детальных наземных данных.

Кроме того, приведенные результаты указывают на возможность повышения эффективности решения ряда задач при комплексной интерпретации результатов спутниковых интерферометрических исследований с данными, полученными в других областях спектра, например, с данными спутника «Landsat» видимого диапазона. Один из первых экспериментов Европейского космического агентства «Tandem mission», проведенный в 1992—1996 гг. с использованием спутников ERS-1 и ERS-2, доказал возможность самого широкого применения данных SAR-интерферометрии. За последние 10 лет были доказаны возможности применения интерферометрии в исследованиях по гляциологии, геологии, при мониторинге земных покровов, контроле наводнений и подтоплений, в лесном хозяйстве, распознавании растительности и для дистанционного определения влажности почв. Как показывает опыт [8—11, 16—19], интерферометрические методы могут значительно повысить эффективность традиционных методов, применяемых в этих областях. Весьма перспективными представляются ассемблирование данных радиолокации и тепловой съемки при исследовании морских акваторий и побережий.

Исследования последних лет показали широкие перспективы такого подхода при решении задач землепользования и ландшафтного управления, особенно в экологически чувствительных районах и областях с высокой техногенной нагрузкой.

Автор благодарен Европейскому космическому агентству (ESA) и Европейскому институту космических исследований (ESRIN) за поддержку и спонсорство этих исследований, а также за предоставление ERS-SAR-данных и специального программного продукта для их обработки. Отдельно благодарю др. Йорга Лихтенегера за его руководство и заботу во время пребывания в ESRIN. Также, выражаю искреннюю благодарность сотрудникам института: Масссимо Барбьери, Симоне Паолони и Нику Уолкеру за их помощь в технических проблемах, связанных с обработкой данных и интерпретацией результатов. Выражаю отдельную благодарность Алин Сайнтот (Vrije Universiteit, Amsterdam), Александру Кичке и всей группе проекта INTAS за предоставленные данные: геологические карты и «Landsat TM» снимки по исследуемому региону.

1. Rocca F., Prati C., Ferretti A. 1997: An overview of ERS — SAR Interferometry // ERS Symp. — Florence, Italy, 1997.—P. XXVII—XXXVI.
2. Raymond D., Rudant J. P. 1997: ERS1 — SAR Interferometry: potential and limits for mining subsidence detection // ERS Symp. — Florence, Italy, 1997.—P. 541—544.
3. Zebker H. A., Madsen S. N., Martin J., at al. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1992.—**30**, N 5.—P. 933—939.
4. Zebker H. A., Rosen P. A., Goldstein R. M., at al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake // J. Geophys. Res.—1994.—**99**, N B10.—P. 19617—19634.
5. ERS SAR Interferometry Workshop // Earth Observation Quaterly. An Overview of FRINGE.—1996.—N 12.
6. Massonnet D., Rabaute T. Radar Interferometry: Limits and Potential // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1993.—**31**, N 2.—P. 455—464.
7. Wegmuller U. The potential ofSAR interferometry for hydrology // Progress in Enviromental Remote Sensing Research and Application / Ed. Parlow. — Balkema, Rotterdam, 1996.—P. 319—323.—ISBN 90 5410 598 4.
8. Duchossois G., Martin P. ERS1 and ERS2 Tandem Operations // IEEE Bulletin.—1995.—N 83.—P. 54—60.
9. Zebker H. A., Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1992.—**30**, N 5.—P. 950—959.
10. Johannessen J. A., Digranes G., Espedal H., at al. SAR ocean feature catalogue. — European Space Agency, 1994.—P. 1—106.—(Preprint).
11. Wooding M. G., Attema E., Aschbacher J., at al. Satellite Radar in Agriculture. Experience with ERS1 — European Space Agency, 1995.—P. 1—67.—(Preprint).
12. Carnec C., Massonnet D., King C. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent // Geophys. Res. Lett.—1996.—**23**, N 24.
13. Wagner W., Borgeaud M., Noll J. Soil Moisture Mapping with the ERC Scatterometer // Earth Observation Quarterly.—1996.—N 54.
14. Nell R. Perlinski, Fawwaz T. Ulaby Dielectric Properties of Soils on the 0.3—1.3 Ghz Range // Transactions on Geoscience and Remote sensing.—1995.—**33**.
15. Kostyuchenko Yu., Kotlyar A. SAR Data Applications in the Area of the Chernobyl Nuclear Power Plant Shelter. — ESA/ESRIN, 2000.—32 p.—(Preprint).
16. Kostyuchenko Yu., Kotlyar A. The Determination of the Rate of Subsidence of the Surface over a Site in the Coal Mining Area of Ukraine. — ESA/ESRIN 2000.—28 p.—(Preprint).
17. Massonet D. Satellite Radar Interferometry // Scientific American.—1997.—P. 46—53.
18. Perski Z. Applicability of InSAR for Land Subsidence: Monitoring of the coal mining region, Upper Silisia, Poland // Fellowship Report, ESA/ESRIN.—1998.—22 p.—Frascati, (unpublished).
19. Prati C., Rocca F., Monti Guarnieri A., Pasquali P. Report on ERS-1 SAR interferometric techniques and applications // ESA rep. 10179/93/YT/I/SC.—1994.—122 p.—Frascati, (unpublished).
20. Atlantis 1999: EarthView version 1.2. Users Guide. — Atlantis Scientific Inc.—1999.—203 p.—Ontario.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 122—126

Атмосферна корекція у видимому діапазоні, оцінювання ОПФ атмосфери

С. А. Смирнов, Н. В. Панова

Інститут космічних досліджень НАН і НКА України, Київ

Як випливає з аналізу літератури [1, 2, 4, 5], загальна постановка задачі атмосферної корекції (АК) виявляється дуже абстрактною, і при всій її корисності в концептуальному плані, у прикладному відношенні потребує істотного уточнення і конкретизації. Тому буде природно почати обговорення проблеми з досить загальних формулювань з наступним їхнім уточненням.

УТОЧНЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧІ

Будемо розглядати задачу АК як задачу відновлення характеристик досліджуваного образа за інформацією, що міститься в його зображенні, за допомогою всебічного врахування внеску атмосфери як середовища поширення електромагнітних сигналів у формування розглянутого зображення. Аналіз фізичних умов поширення випромінювання в атмосфері показує, що розв'язання задачі АК у всьому діапазоні частот електромагнітних вимірів не є можливим. Варто окремо розглядати відповідні задачі для різних спектральних діапазонів. Далі ми розглядаємо видимий оптичний діапазон електромагнітного спектра.

Перелічимо найістотніші фактори [4], що впливають на проходження оптичної інформації через атмосферу:

1) товщина шару атмосфери (висота польоту);

2) прозорість атмосфери (наявність атмосферного серпанка);

3) спектральні характеристики пропускання атмосфери;

4) висота Сонця над обрієм (час року і час доби з урахуванням географічних координат місця зйомки);

5) величина кута між оптичною віссю сканера (чи АФА) і вертикаллю до поверхні Землі;

6) погодженість спектральних характеристик атмосфери, об'єктів зйомки зі спектральними характеристиками оптичних систем і приймачів систем ДЗЗ.

Перші три фактори обумовлені фізичними процесами взаємодії оптичного випромінювання з газовим середовищем і домішками, наступні два суто геометричні, і останній визначається внутрішньою «збалансованістю», погодженістю оптичної та приймальної систем із властивостями атмосфери і використовуваним діапазоном випромінювання, що повною мірою є виразом системної природи задачі дистанційного зондування.

Використовуючи діапазон частот оптичного випромінювання, ми не враховуватимемо всі ефекти, що мають в основному нелінійний характер та призводять до тієї чи іншої трансформації герцівських частот (часової модуляції оптичного сигналу). Для сонячного світла в земній атмосфері зроблене припущення виконується з дуже високою точністю (його порушення досліджується в лабораторних умовах і пов'язане з високими значеннями інтенсивності випромінювання і щільності газового середовища). При цьому ослаблення контрастності зображення внаслідок ефектів спектральної природи при аналізі малоконтрастних сцен є істотним чинником, який в загальному випадку не можна відкидати і який заслуговує ретельного дослідження. Однак у даній роботі таке дослідження не проводиться.

Ефект просторової модуляції оптичного випромінювання в атмосфері будемо вважати основним фактором, який визначає природу спотворення оптичної інформації, що мотивує пропоновану постановку задачі АК. І знову будемо нехтувати нелінійними ефектами. Коректність такого припущення забезпечується тими ж аргументами про щільність і інтенсивність [2], що наведені вище. Додатково необхідно ввести в розгляд, крім фізичних, ще й структурно-геометричні фактори. Зазначимо, що поняття просторової модуляції засноване на введенні просторових частот, ефективність застосування яких пов'язана з достатнім ступенем неоднорідності і масштабними характеристиками поля яскравості досліджуваної сцени (потрібні дані високого розрізнення). У тих випадках, коли оптичні вла-

© С. А. СМИРНОВ, Н. В. ПАНОВА, 2002

стивості сцени характеризуються високим ступенем однорідності по її довжині, просторово-частотний підхід не спрацьовує. При цьому ефекти просторової модуляції не спавляють відчутного впливу на формування образу, а основний внесок дають адитивні атмосферні перешкоди (що може виявлятися, зокрема, через ефекти часової модуляції). Для їхнього моделювання можуть бути використані слабокорельовані випадкові поля (просторово розподілені аналоги квазібілих шумів), а для розв'язання задачі фільтрації можна запропонувати відповідні процедури теорії Колмогорова—Вінера. Дуже бажано також скористатися інформацією про «оптичну погоду» на момент зйомки.

Далі ми припускаємо, що достатній ступінь інформативності просторово-частотного зображення сцени і просторова модуляція здійснюють основний ефект, що веде до атмосферних спотворень. У таких умовах вплив атмосфери на оптичний сигнал має мультиплікативний характер і задається оптичною передавальною функцією (ОПФ). Таким чином, нашою метою є побудова просторово-частотної моделі атмосфери. Знання ОПФ відповідного атмосферного шару дозволяє звести задачу АК до задачі обернення функції.

Тепер уточнимо описану постановку задачі АК для випадку даних ДЗЗ, наданих з КА «Океан-О». Уточнення пов'язані зі складом бортової апаратури КА, і для нашої постановки важливі характеристики оптичних інструментів.

Визначимо спектральний діапазон просторових частот: $1/\alpha < \Omega < 1/\beta$, тут α — ширина смуги огляду, β — просторове розрізнення приладу:

МСУ-В $\quad 5\cdot10^{-6}$ м$^{-1} < \Omega < 0.02$ м$^{-1}$,
МСУ-СК $\quad 1.6\cdot10^{-6}$ м$^{-1} < \Omega < 4\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$,
МСУ-М $\quad 5\cdot10^{-7}$ м$^{-1} < \Omega < 6\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$.

Саме в цьому просторово-частотному діапазоні представлена інформація, що заслуговує довіри. В квадраті $[1/\alpha, 1/\beta]\times[1/\alpha, 1/\beta]$ необхідно відновити ОПФ атмосфери, пам'ятаючи, що вона залежить не тільки від двох просторових частот, але і від частоти випромінювання і ряду атмосферних параметрів.

Пропонується наступна послідовність дій. Теоретичний аналіз фізичних механізмів переносу випромінювання в атмосфері дозволить визначити структуру ОПФ із деякими невизначеними параметрами, а наступна обробка космічних знімків дозволить виконати ідентифікацію просторово-частотної моделі й одержати оцінки невизначених параметрів.

Для розв'язання задачі АК у такій постановці потрібні знімки, отримані за допомогою відповідних приладів, деяких «еталонних» утворень на земній поверхні (не обов'язково спеціальних полігонів, оскільки вони використовуються для калібрування знімальних пристроїв, а сцен, де є різкі краї чи границі будь-якої природи), інформація про параметри атмосфери (метеорологічна й ін.), геометрична інформація (про взаємне розташування Сонця, сцени на земній поверхні, що знімається, і приладу).

Необхідно прояснити питання про залежність ОПФ атмосфери від герцівської частоти в робочому спектральному діапазоні кожного приладу, що використовується. Варто очікувати слабку залежність (малі зміни) у границях діапазону, що спрощує обробку знімків за рахунок редукції до монохромної задачі.

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ І ЗАГАЛЬНА СХЕМА АТМОСФЕРНОЇ КОРЕКЦІЇ ОПТИЧНИХ ЗНІМКІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ З КОСМОСУ

Отже, відповідно до постановки задачі, атмосферна корекція полягає у приведенні отриманого за межами атмосфери зображення земної поверхні до зображення на «нульових висотах». Для цього необхідно провести оцінювання і фільтрацію спотворень і шумів різної фізичної природи: адитивних шумів від фонового атмосферного розсіювання; мультиплікативних спотворень, що виникають внаслідок молекулярного й аерозольного розсіювання і поглинання; ефектів атмосферної турбулентності.

Основні ідеї методики, що розвивається в роботі, містяться у наступних положеннях:

1) просторово-частотна передавальна функція атмосфери може бути «зібрана», виходячи з уявлень про структуру атмосфери (атмосферні шари і домінуючі в них оптичні явища);

2) структурна оптична модель атмосфери дозволяє побудувати модель фонових адитивних перешкод і відповідні процедури фільтрації;

3) невідомі параметри отриманої ОПФ можуть бути оцінені по інформації про структуру ОПФ і інформації, яка міститься в самих знімках (спеціалізовані процедури ідентифікації);

4) ОПФ оптичних інструментів також використовуються для поліпшення якості корекції.

Прокоментуємо їх послідовно.

Добре відомо, що існує поділ атмосферних шарів за їхніми оптичними властивостями. До висот 2-3 км визначальну роль відіграє вологість та тропосферні аерозолі. До висот близько 8 км — молекулярне (релеївське) розсіювання. Потім іде шар високої оптичної прозорості, а починаючи з висот 20 км істотну роль відіграють озон і стратосферні аерозолі. Композиція шарів характеризується

ОПФ, що обчислюється по формулі послідовного з'єднання. Накладення ефектів в одному шарі (наприклад, водночас аерозольне і турбулентне розсіювання) враховується як паралельне з'єднання. Таким чином, знаючи ОПФ основних процесів пошарово, за допомогою операцій алгебри передавальних функцій може бути обчислена модельна ОПФ атмосфери з точністю до деяких невизначених коефіцієнтів.

Адитивні фонові перешкоди (відбите атмосферою сонячне світло, що не дійшло до земної поверхні) є визначальним чинником, відповідальним за погіршення контрастності космічних знімків. Оптична структурна модель атмосфери дозволить оцінити ефекти розсіювання «назад» і підібрати придатну схему фільтрації.

У зв'язку з тим, що структура модельної ОПФ атмосфери істотно відрізняється від дробово-раціональної функції (як добре відомо, вона містить ірраціональні залежності [1]), стандартні процедури параметричної ідентифікації не можуть бути використані. З урахуванням цього фактора а також необхідної умови дискретності зображень і відповідних передатних функцій, розвиваються спеціальні методи розв'язання задачі ідентифікації ОПФ атмосфери. Попередня підготовка даних для ідентифікації пов'язана з наявністю на зображенні прикордонних кривих і обчисленням функцій розмиття ліній. Наступна побудова оцінок невизначених коефіцієнтів дозволяє знайти найкращі апроксимації цих функцій у класі, обумовленому структурою модельної ОПФ атмосфери.

Дуже важливим є аспект, пов'язаний із просторово-частотним перетворенням, що виконується самим оптичним інструментом, за допомогою якого отримане вихідне зображення. Оскільки зв'язок між характеристиками сцени і зображення задається формулою

$$B(p_x, p_y) = \Psi_{op}(p_x, p_y)\Psi_{at}(p_x, p_y)V(p_x, p_y),$$

де $\Psi_{op}(p_x, p_y)$, $\Psi_{at}(p_x, p_y)$ — ОПФ оптичної системи й атмосфери, то обернення ОПФ атмосфери задачу не розв'язує. Необхідно перед цим виконати обернення ОПФ використовуваного оптичного інструмента. Очевидно, врахуванням цих обставин пояснюються причини тісного пов'язування алгоритмів атмосферної корекції з конкретним космічним інструментом у іноземних роботах. ОПФ унікальна для кожного приладу, але в якості грубого першого наближення може використовуватись формула лінзи:

$$M_{op}(\chi) = \begin{cases} \frac{2}{\pi}\arccos\frac{\chi}{\alpha} - \frac{\chi}{\alpha}\sqrt{1-(\chi/\alpha)^2}, & 0 \le \frac{\chi}{\alpha} \le 1, \\ 0, & 1 < \left|\frac{\chi}{\alpha}\right|, \end{cases}$$

де $\alpha = kd/(2F)$, k — хвильове число випромінювання, d — діаметр вхідного отвору системи, F — фокусна відстань, $\chi = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ — просторова частота. Необхідно також узяти до уваги дискретну структуру чуттєвого елемента сканера (ПЗЗ-лінійки), що необхідно спричиняє використання дискретних перетворень Фур'є та дискретних передавальних функцій.

ПРОЦЕДУРА РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОПФ

Задача оцінювання параметрів моделі по експериментальних даних буде розв'язуватись в такий спосіб. Розглянемо стаціонарну дискретну систему з одним входом і одним виходом і адитивним шумом:

$$y(t)=G(q)\,u(t)+v(t), \qquad (1)$$

де $y(t)$, $u(t)$, $v(t)$ — скалярний вихідний, вхідний сигнали і збурювання відповідно. Комплекснозначна функція $G(z)$, $z \in C$ — передавальна функція системи, q^{-1} — оператор одиничного просторового зсуву. Будь-яка описана система може описуватись моделлю скінченої імпульсної реакції з передавальним оператором, що розкладається в ряд $G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k^0 q^{-k}$, як в роботі [3].

Нехай система стійка, і для неї виконується $\sum_{k=1}^{\infty} |g_k^0| < \infty$, тобто $G(z)$ аналітична при $|z| > 1$ і неперервна при $|z| \ge 1$. Крім того, апріорно відомо, що вона парна, не має дійсних полюсів і $G(z) = G\left(\frac{1}{\sqrt{1+z^2d^2}}, \exp(-b^2z^2)\right)$, де d і b — деякі параметри.

Задача полягає в оцінюванні передавального оператора $G(q)$ за експериментальними даними $\{y(t), u(t)\}$, $t = 1,\ldots, N$. Для цього широко використовується метод розкладання функції в ряд [3], коли необхідно оцінити коефіцієнти цього розкладу. Такий непараметричний підхід часто призводить до моделей дуже високого порядку. Вони незручні у використанні, якщо є потреба розв'язувати задачі високої розмірності, і/або в реальному масштабі часу.

Тому в роботі використовується змішаний параметрично-непараметричний підхід [6]. Стійкий передавальний оператор $G(q)$ можна розділити на дві підмоделі: домінуючу параметричну модель низького порядку $G(q, \theta)$, $\theta \in R^n$, що відповідає за низькі середньочастотне поводження системи, і непараметричну модель $\Delta G(q)$, яка включає динаміку, що не моделюється:

$$G(q) = G(q, \theta) + \Delta G(q). \qquad (2)$$

Застосуємо до даної моделі апарат лінійного регресійного оцінювання. З огляду на те, що розглянута модель нелінійна, представимо лише параметричну частину (2) у вигляді функції, лінійної по параметрах:

$$G(q) = \sum_{k=1}^{n} g_k \Psi_k(q),$$
$$\theta = [g_1, g_2, \ldots, g_n], \qquad (3)$$

де $\Psi_k(q)$ — деякий набір лінійних базових фільтрів. Даному опису відповідає багато різних моделей фільтрів. Наприклад, лінеаризована авторегресійна модель (ARX-модель), ортонормовані базисні функції і т. д. Якщо вибрати

$$\Psi_k(q) = q^{-k}, \qquad (4)$$

то вийде модель скінченої імпульсної реакції (FIR-модель). Вибравши

$$\Psi_k(q) = \frac{\sqrt{1-a^2}}{q-a}\left(\frac{1-aq}{q-a}\right)^{k-1}, \quad -1 < a < 1, \qquad (5)$$

прийдемо до моделі Лагерра. Параметр a потрібно вибирати близьким до домінуючого полюсу системи. Така модельна структура дає гарну апроксимацію низького порядку систем зі швидко загасаючим передавальним оператором. Проте вона не може описувати системи з декількома розкиданими домінуючими полюсами, а також резонансні системи із комплексно спряженими полюсами.

А при

$$\Psi_k(q) =$$
$$= \begin{cases} \dfrac{\sqrt{1-c^2}(q-b)}{q^2+b(c-1)q-c} Q^{(k-1)/2} & k \text{ парне}, \\ \dfrac{\sqrt{(1-c^2)(1-b^2)}}{q^2+b(c-1)q-c} Q^{(k-2)/2}, & k \text{ непарне}, \end{cases}$$
$$-1 < b < 1, \quad -1 < c < 1,$$
$$Q = \frac{-cq^2 + b(c-1)q + 1}{q^2 + b(c-1)q - c},$$

отримаємо модель Коца для ідентифікації систем з резонансом. Для апроксимації чисто загасаючих процесів параметри b і c потрібно вибирати такими, щоб корені рівняння

$$z^2 + b(c-1)z - c = 0 \qquad (6)$$

були близькі до домінуючих комплексних полюсів системи β і β^*: $b \approx (\beta + \beta^*)/(1 + \beta\beta^*)$, $c \approx -\beta\beta^*$. Збільшуючи число членів розкладання в моделях Лагерра і Коца, можна компенсувати неточну апріорну інформацію про домінуючі полюси.

Крім того, у загальному випадку $\Psi_k(q)$ може бути лінійною комбінацією перерахованих вище фільтрів.

Для вибору фільтра скористаємося апріорною інформацією.

Перетворимо (2) у лінійну регресію з обмеженим шумом. Тоді співвідношення вхід-вихід прийме вигляд

$$y(t) = \varphi(t)^T \theta + w(t) + v(t) + z(t), \qquad (7)$$

де позначено $\varphi(t) = [\Psi_1(q)u(t), \ldots, \Psi_n(q)u(t)]^T$, $w(t) = \Delta G(q)u(t)$ — помилка моделювання, $z(t)$ визначається перехідним процесом.

Оцінка методу найменших квадратів θ мінімізує критерій

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} [y(t) - \varphi(t)^T\theta]^2, \qquad (8)$$

тобто суму квадратів помилок прогнозування. Розв'язок цієї квадратичної задачі оптимізації має вигляд

$$\hat{\theta}_N = R_N^{-1} f_N, \qquad (9)$$

де

$$R_N = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)\varphi(t)^T,$$
$$f_N = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)y(t). \qquad (10)$$

Щоб обчислити значення $\varphi(t)$, потрібно визначити початкові умови для фільтрів $\Psi_k(q)$ одним з наступних способів.

1) Вибрати початкові значення нульовими, що оптимально, якщо система знаходиться на початку експерименту.

2) Включити невідомі початкові умови в число оцінюваних параметрів.

3) Установити нульові початкові значення, почекати, поки закінчиться перехідний процес, і тільки тоді обчислювати оцінку.

Результат задачі ідентифікації буде залежати від числа обумовленості матриці R_N. Якщо вона вироджена чи близька до такої, необхідно застосовувати регуляризуючі алгоритми.

Розглянемо конкретніше випадок FIR-моделі. Для неї $g_k = g_k^0$, вектор регресорів $\varphi(t)$ прийме простий вигляд $\varphi(t) = [u(t-1), \ldots, u(t-n)]^T$, і оптимізаційна задача буде вирішуватись таким способом.

Експериментальні дані системи складаються з відомої точно вхідної послідовності $u(t)$ ($u(t) = 0$ при $t \le 0$, $u(1) \ne 0$) і вимірів перших 0 компонентів вихідної послідовності $y(t)$, на які впливає зовнішній шум $v(t)$, отриманих згідно з виразом

$$y(i) = \sum_{k=1}^{n} g_k u(i-k) + v(i), \qquad (11)$$
$$i = n+1, \ldots, n+N.$$

Тоді, позначивши $\mathbf{Y}_N^T = [y(n+1),\ldots, y(n+N)]$ і $\mathbf{V}_N^T = [v(n+1), \ldots, v(N+n)]$, вираз (11) можна записати в матричній формі

$$\mathbf{Y}_N = \mathbf{F}_N\theta + \mathbf{V}_N, \tag{12}$$

де $\mathbf{F}_N$ — у загальному випадку прямокутна матриця розмірності $N\times n$:

$$\mathbf{F}_N = \begin{bmatrix} u(n) & u(n-1) & \ldots & u(1) \\ u(n+1) & u(n) & \ldots & u(2) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ u(N+n-1) & u(N+n-2) & \ldots & u(N) \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Метод найменших квадратів дасть оцінку (9), де $\mathbf{R}_N = \mathbf{F}_N^T\mathbf{F}_N$ і $\mathbf{f}_N = \mathbf{F}_N^T\mathbf{Y}_N$. Якщо матриця $\mathbf{R}_N$ невироджена, тоді задача має єдиний розв'язок θ_N.

Щоб одержувати оцінку в кожен момент часу, можна скористатися рекурентним алгоритмом найменших квадратів [5]. У момент N маємо

$$\hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} + \frac{1}{N}R_N^{-1}x_N(y_N - x_N^T\hat{\theta}_{N-1}), \tag{14}$$

$$R_N = \frac{N-1}{N}R_{N-1} + \frac{1}{N}x_Nx_N^T, \tag{15}$$

де використано розбиття на блоки матриці $\mathbf{F}_N$ і вектора $\mathbf{Y}_N$:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_N^T &= [F_{N-1}^T : x_N], \\ \mathbf{Y}_N^T &= [Y_{N-1}^T : y_N]. \end{aligned} \tag{16}$$

При цьому в момент $N-1$ запам'ятовується тільки скінченновимірний інформаційний вектор $X(N-1) = [\hat{\theta}_{t-1}, R_{N-1}]$.

Щоб уникнути обертання матриці $\mathbf{R}_N$ на кожному кроці, зручно рекурентно обчислювати обернену до неї матрицю. Позначимо $\mathbf{P}_N = \mathbf{R}_N^{-1}$. Тоді

$$\hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} + L_N(y_N - x_N^T\hat{\theta}_{N-1}),$$

$$L_N = \frac{P_{N-1}x_N}{N-1+x_N^TP_{N-1}x_N},$$

$$P_N = \frac{N}{N-1}\left(P_{N-1} - \frac{P_{N-1}x_Nx_N^TP_{N-1}}{N-1+x_N^TP_{N-1}x_N}\right).$$

Визначені усі компоненти ідентифікаційної процедури ОПФ атмосфери, що містить ірраціональні залежності.

Таким чином, у роботі запропоновано уточнення загальної постановки задачі атмосферної корекції космічних зображень земної поверхні на випадок використання оптичного діапазону частот електромагнітного випромінювання, викладено концепцію і структуру побудови повної процедури атмосферної корекції як послідовності моделей, та розроблено спеціальний метод ідентифікації оптичної передавальної функції атмосфери з урахуванням її математичних особливостей, пов'язаних з фізикою процесу переносу випромінювання.

1. Зеге Э. П., Иванов А. П, Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985, 327 с.
2. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех).—М.: Советское радио, 1977, 368 с.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1991.—432 с.
4. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. Учебник.—М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 1997.—378 с.
5. Сушкевич Т. А. О решении задачи атмосферной коррекции спутниковой информации // Исследование земли из космоса.—1999, № 6.—С. 42—59.
6. Giarre L., Kacewicz B. Z, Milanese M. Model quality evaluation in set membership identification // Automatica.—1997.—33, N 6.—P. 1133—1139.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 127—133

Технология построения трехмерных карт внутренних помещений объекта «Укрытие»

Т. А. Кравчук[1], А. Н. Ненахов[1], Г. Л. Гимельфарб[2], Б. О. Михалевич[3]

[1]Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие» НАН Украины, Чернобыль

[2]Center for Image Technology and Robotics, Department of Computer Science, Tamaki Campus, University of Auckland, Auckland, New Zealand

[3]German Aerospace Center (DLR), Institute of Space Sensor Technology and Planetary Exploration, Department of Passive Sensor Systems, Berlin, Germany

Известные в настоящее время программы автоматического восстановления рельефа, входящие в состав коммерческих фотограмметрических пакетов, не позволяют проводить фотограмметрическую обработку снимков закрытых помещений, и рассчитаны на использование специализированной съемочной аппаратуры (фотоаппаратов и сканеров). Основные области их применения — картография и дистанционное зондирование Земли, где эти пакеты используются для восстановления цифровых моделей рельефа земной поверхности по стереоскопическим аэрокосмическим снимкам. В этих приложениях восстанавливаемую поверхность можно рассматривать как непрерывную, видимую во всех точках стереоскопически и почти не имеющую на каждом из снимков стереопары участков, загороженных другими участками.

При трехмерном построении карт закрытых помещений чаще всего эти условия не выполняются: в этих случаях большинство поверхностей имеют разрывы из-за взаимного загораживания по отношению к каналам стереосъемки.

В традиционной фотограмметрии используются, как правило, высокоточные и потому дорогие фотокамеры воздушного и наземного базирования. Предлагаемая технология предполагает, что исходные стереосъемки производятся неспециализированными недорогими фотоаппаратами (бытовыми или профессиональными). Применение неспециализированной техники значительно снижает затраты на проводимые работы (в особенности если радиационная обстановка в местах съемки не позволяет в дальнейшем использовать эту технику) и выполнять съемки в тех труднодоступных местах, в которые невозможно пройти с громоздкими специализированными фотограмметрическими приборами. Разумеется, использование неспециализированной съемочной аппаратуры приводит к определенной потере точности измерений и существенно изменяет процедуры калибровки аппаратуры. Для проведения фотограмметрических работ невозможно использовать оцифрованные материалы видеосъемки из-за их очень низкого пространственного разрешения и крайней сложности ориентирования.

В частности, съемки внутренних помещений объекта «Укрытие» должны выполняться бытовыми или профессиональными фотоаппаратами с ручной (и неизменной в процессе начальной калибровки и собственно съемки) настройкой по резкости, диафрагме и выдержке.

Работы могут выполняться как по черно-белым, так и по цветным снимкам. Использование цветных снимков позволяет значительно ускорить и повысить качество обработки за счет лучшей интерпретации ситуации оператором (по сравнению с черно-белыми снимками) и получить дополнительную информацию об объектах за счет цветовой кластеризации.

Рабочей платформой для данной технологии является компьютер на основе процессора класса Pentium, оснащенный графической видеосистемой высокого разрешения и стереоскопической приставкой.

Технология цифровой фотограмметрической обработки стереоскопических снимков преследует такие цели:

— упростить процесс построения карт рельефа и трехмерных моделей закрытых помещений объекта «Укрытие» по материалам многократных стереофотосъемок;

— использовать для этих работ результаты стереосъемок, проведенных с помощью обычных (неспециализированных) фотоаппаратов.

Внедрение такой технологии позволит:

— сократить длительность и уменьшить стоимость проведения измерительных работ, которые должны

© Т. А. КРАВЧУК, А. Н. НЕНАХОВ, Г. Л. ГИМЕЛЬФАРБ, Б. О. МИХАЛЕВИЧ, 2002

выполняться на объекте «Укрытие» в экстремальных радиационных условиях;
— получить результаты измерений пространственного рельефа помещений с высокой скоростью и достаточной для практики точностью;
— упростить ввод данных в современные системы автоматизированного инженерного проектирования и геоинформационные системы (ГИС);
— получить результаты стереоскопических измерений, которые недоступны без использования технологий цифровой фотограмметрии.

Предлагаемая технология частично основана на оригинальных результатах, которые обладают лицензионной чистотой и не имеют аналогов среди известных отечественных и зарубежных работ. К ее основным особенностям относятся:
— использование цифровой фотограмметрии для построения трехмерных моделей закрытых помещений при заранее неизвестном и заведомо резко ограниченном объеме данных, требуемых для калибровки съемочной аппаратуры;
— необходимость использования неспециализированных фотокамер для проведения фотограмметрических съемок;
— необходимость объединения в едином технологическом процессе интерактивного и автоматического восстановления рельефа и пространственного положения объектов сцены.

Основным звеном технологии является комплекс программ, позволяющих проводить калибровку съемочной фотоаппаратуры; ориентирование и трансформирование снимков; получать по цифровой стереопаре координаты объектов, восстанавливать пространственный рельеф поверхности и строить трехмерную графическую модель наблюдаемого помещения в интерактивном и автоматизированном режимах.

Технология получения трехмерных карт помещений объекта «Укрытие» основана на следующих основных этапах получения и обработки стереоснимков и сопутствующих данных:
— подборе съемочной аппаратуры и предварительной калибровке;
— предварительном анализе особенностей конкретного помещения и выработке требований к сбору снимков;
— окончательной калибровке аппаратуры с возможной адаптацией программно-алгоритмического обеспечения;
— разработке методики, планированию и проведению натурной стереосъемки, подготовительных работах;
— фотографической обработке и фотопечати снимков;
— оцифровке фотоматериалов;
— внутреннем и взаимном ориентировании снимков стереопар, приведение к базисной геометрии, внешнем ориентировании, пространственная фототриангуляция и построения единой фотограмметрической модели;
— интерактивном построении цифровой карты помещения по набору снимков, автоматическом восстановлении рельефа на отдельных участках;
— интерактивном редактировании цифровой карты и формировании цифровой трехмерной графической модели помещения.

Для получения пространственных координат точек (объектов) и пространственного рельефа закрытого помещения по снимкам производится стереоскопическая фотосъемка. Стереосъемка выполняется одним или двумя аппаратами из различных точек, отстоящих на определенное расстояние (базис стереосъемки), при этом поля зрения должны иметь перекрытие и оптические оси должны быть параллельными.

Основные условия съемки, определяющие точность результатов: длина базиса, величина фокусного расстояния, размер используемого фотоматериала.

Длина базиса должна быть сопоставима с размерами измеряемых объектов, фокусное расстояние фотоаппарата для метрической стереосъемки должно быть порядка 50...100 мм. Длина базиса и фокусное расстояние оказывают совместное влияние на величину стереоскопического перекрытия, которое должно составлять 60...80 % снимаемой поверхности. В частности, для контрольной стереопары, полученной с помощью бытового фотоаппарата «Minolta» с фокусным расстоянием 50 мм и кадром 24×36 мм, были выполнены следующие операции:
— оцифровка фотоотпечатков снимков стереопары формата 9×12 см с помощью сканера с разрешающей способностью 0.085 мм на точку;
— предварительная обработка с целью выравнивания фотографического тона и улучшения визуального восприятия стереопары;
— внутреннее ориентирование снимков (определение положения центра снимка и масштабов по осям);
— взаимное ориентирование и трансформирование снимков стереопары для приведения к базисной геометрии;
— интерактивное восстановление пространственных координат отдельных точек наблюдаемой сцены в режиме ручного цифрового стереокомпаратора;
— проверка точности восстановления путем сравнения полученных и известных размеров отдельных объектов;
— построение трехмерной каркасной модели отдельных выделенных объектов для использования в

Рис. 1. Исходная стереопара

Рис. 2. Изображения стереопары с системами координат цифровых изображений $O_P X_P Y_P$ и исходных фотоснимков $O_S X_S Y_S$

Рис. 3. Исходная стереопара с обозначенными соответственными точками и центрами снимков O_S

Рис. 4. Трансформированная стереопара с обозначенными соответственными точками, центрами исходных O_S и трансформированных снимков O_T

Рис. 5. Изображения стереопары с обозначенными соответственными точками

Рис. 6. Изображения стереопары с прорисованными контурными линиями

системе AutoCAD.

Внешнее ориентирование снимков не производилось из-за отсутствия необходимых измерений на местности, хотя в программном обеспечении эти параметры учитываются. В качестве параметров внешнего ориентирования в эксперименте использовались реальное значение базиса стереосъемки и условные координаты центров проектирования.

В состав разработанного программного обеспечения входят следующие автономные модули:

— цифровой стереокомпаратор, позволяющий определять координаты точек трехмерной сцены по координатам соответствующих точек на снимках, продольные и поперечные параллаксы этих точек снимков и визуализировать снимки стереопары в стереоскопическом и анаглифическом режимах;

— программа внутреннего ориентирования цифровых снимков;

— программа взаимного ориентирования снимков стереопары;

— программа внешнего ориентирования цифровых снимков;

— программа пространственного трансформирования цифровых снимков (используется для приведения к базисной геометрии);

— программа определения пространственных координат по координатам точек на снимках;

— программа построения трехмерной каркасной модели в формате DXF по пространственным координатам узловых точек.

Полученные снимки были отпечатаны на фотобумаге формата 9×12 см и оцифрованы сканером EPSON GT-6000 в режиме «GrayScale» с разрешением 300 DPI. Размер цифровых изображений равен 1200×1800 пкл, объем одного изображения составляет 2.1 MB. Для работы выбрана стереопара, показанная на рис. 1.

Проведено внутреннее ориентирование снимков. По координатам углов фотоотпечатков на цифровых изображениях и размерам кадрирующей рамки фотоаппарата были определены направления координатных осей, рассчитаны координаты центров снимков и эквивалентный масштаб цифровых изображений.

На рис. 2 показаны углы и центры снимков, координатные оси фотоснимков и цифровых изображений. Рис. представляет соотношение координатных систем цифровых изображений $O_P X_P Y_P$ и исходных снимков $O_S X_S Y_S$. Начало координат цифрового изображения O_P находится в его левом верхнем углу. Ось X_P — горизонтальная, направлена вправо. Ось Y_P — вертикальная, направлена вниз. Единица измерений — пиксель. Начало координат фотоснимка O_S совпадает с точкой, через которую проходит оптическая ось фотоаппарата (луч выходящий из центра проекции и перпендикулярный плоскости фотопленки). Оси данной системы параллельны сторонам прижимной рамки фотоаппарата. Ось X_S — горизонтальная, направлена вправо. Ось Y_S — вертикальная, направлена вверх. Единица измерений — миллиметр. В общем случае оси фотоснимка и оси цифрового изображения могут не быть параллельными.

Взаимное ориентирование выполняется для устранения разворотов снимков и приведения снимков к базисной геометрии, т. е. к «идеальной» стереопаре. При этом снимки располагаются в одной плоскости, оптические оси взаимно параллельны и перпендикулярны к базису стереосъемки. Приведение снимков стереопары к базисной геометрии делает более удобной работу оператора и упрощает последующие расчеты.

Взаимное ориентирование снимков предполагает нахождение пяти угловых элементов взаимного ориентирования, определяющих взаимные повороты снимков в пространстве. Оно проводится по координатам соответственных точек снимков методом последовательных приближений с использованием расчета приращений угловых элементов взаимного ориентирования, направляющих косинусов и трансформированных координат. Критерием взаимного ориентирования являются «остаточные» поперечные параллаксы.

На контрольной стереопаре были выбраны девять пар соответственных точек. По элементам взаимного ориентирования было выполнено трансформирование исходных снимков. Исходные и трансформированные снимки с указанными на них соответственными точками представлены на рис. 3 и 4.

В процессе взаимного ориентирования также было уточнено значение фокусного расстояния фотоаппарата (паспортное 50 мм). Уточнение производилось путем последовательных приближений по минимуму остаточных поперечных параллаксов. Минимум достигался при значении фокусного расстояния равного 47.35 мм.

Внешнее ориентирование снимков проводится по опорным точкам местности с известными координатами во внешней трехмерной системе координат (геодезической или местной) с целью определения пространственного положения фотоаппарата и оптической оси относительно данной системы на момент проведения съемки, т. е. привязки снимков к местности и привязки определяемых координат объектов к внешней системе координат. К параметрам внешнего ориентирования принадлежат три метрических элемента — пространственные координаты центра проекции X_S, Y_S, Z_S и три угловых элемента, определяющие пространственное направление оптической оси, — α, ω, κ.

На обрабатываемую контрольную стереопару нет данных по опорным точкам местности, поэтому внешнее ориентирование снимков не производилось. Координаты центров проекции и рассчитываемые координаты точек объектов заданы в фотограмметрической системе координат. Ее начало совпадает с центром проекции левого снимка, оси X и Y этой системы параллельны соответствующим осям левого снимка, ось Z перпендикулярна плоскости левого снимка и проходит через центр проекции. В такой системе координат ось абсцисс и базис стереосъемки совпадают.

Дальнейшая обработка стереопары проводилась с использованием программы реализующей функции цифрового стереокомпаратора. Программа позволяет отображать снимки стереопары в стереоскопическом и анаглифическом режимах, определять координаты точек на цифровых и исходных фотоснимках, получать значения продольных и поперечных параллаксов, рассчитывать пространственные координаты точек на местности.

На изображениях стереопары было выбрано 119 контурных точек (края труб, углы блоков и т. п.). На рис. 5 представлены изображения с отмеченными соответственными точками, на рис. 6 — с прорисованными контурными линиями. Для каждой точки были измерены координаты на левом и правом цифровых изображениях. По этим координатам и элементам внутреннего ориентирования было рассчитано положение точек на фотоснимках. Перевод координат точки из системы координат цифрового изображения в систему координат снимка осуществляется по формулам:

$$X_s = (X_p - XOs_p)m_X;$$
$$Y_s = (Y_p - YOs_p)m_Y,$$

где X_s и Y_s — координаты точки на снимке, X_p и Y_p — координаты точки на цифровом изображении, XOs_p и YOs_p — координаты центра фотоснимка на цифровом изображении, m_X и m_Y — масштабные коэффициенты.

В соответствии с формулами $p = x_1 - x_2$ и $q = y_1 - y_2$ по координатам точек на снимках были рассчитаны продольные и поперечные параллаксы. Отсутствие поперечных параллаксов свидетельствует о том, что данная стереопара приведена к базисной геометрии (к «идеальной» стереопаре).

По координатам точек и продольным параллаксам на снимках было рассчитано их пространственное положение относительно центра съемки левого снимка, принятого за начало местной системы координат. Для расчета использовались упрощенные формулы, применяемые в случае идеальной стереопары:

$$Z = \frac{fB}{p}, \qquad X = \frac{xZ}{f}, \qquad Y = \frac{yZ}{f}$$

или

$$Z = \frac{fB}{p}, \qquad X = \frac{xB}{p}, \qquad Y = \frac{yB}{p},$$

где B — базис съемки, f — фокусное расстояние фотоаппарата, x и y — координаты точки на левом снимке; p — продольный параллакс; X, Y и Z — координаты точки на местности.

Для проверки точности определения положения точек объектов были рассчитаны расстояния между некоторыми их них. Расстояние рассчитывалось как евклидова дистанция в трехмерном пространстве:

$$L = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}.$$

Из объектов, изображенных на снимках, истинные размеры известны только для графитовых блоков, находящихся в центре изображения (таблица).

Среднее значение относительной ошибки составляет 6 %. Наибольшие значения ошибок получены при измерении объектов, находящихся в тени и имеющих разрушенные края, т. е. в ситуации, когда невозможно осуществить точное отождествление измеряемых точек. Это связано с дискретностью цифрового изображения и невозможностью наведения на точку с точностью, превышающей размеры элемента дискретизации. С повышением разрешающей способности сканирования точности ориентирования снимков и использовании стереоскопического наблюдения можно повысить точность получаемых результатов и уменьшить ошибки.

По трехмерным координатам точек объектов с помощью программы-конвертора была построена трехмерная векторная модель измеряемых объектов. Записанная в формате DXF модель была вве-

Расстояния между точками объектов

Точки	Объект	Расчетное расстояние, мм	Реальное расстояние, мм	Абсолютная ошибка, мм	Относительная ошибка
87—88	Графитовый блок	266.060	250.000	−16.060	6.4
89—90	Графитовый блок	321.879	250.000	−71.879	28.7
93—94	Графитовый блок	250.493	250.000	−0.493	0.0
95—96	Графитовый блок	249.764	250.000	0.236	0.0

дена в систему автоматического проектирования AutoCAD. Средствами AutoCAD модель была записана в формате DWG.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что внедрение предлагаемой цифровой стереофотограмметрической технологии на объекте «Укрытие» позволит:

Получать трехмерные карты закрытых помещений по материалам специально организованной стереофотосъемки;

Использовать недорогие бытовые неспециализированные фотоаппараты, а дальнейшую обработку материалов проводить с использованием персональной компьютерной техники и минимума нестандартного оборудования;

Использовать разработанное программное обеспечение, наиболее полно учитывающее особенности помещения и применяемого для исследования оборудования;

Получать результаты, принципиально недоступные без использования цифровых методов, упростив ввод получаемых результатов в САПР и ГИС;

Существенно снизить время пребывания людей в помещениях с высоким уровнем загрязнения и повысить эффективность выполняемых работ, ограничив пребывание на объекте «Укрытие» подготовкой и проведением съемки;

Сосредоточить в «чистых» условиях основные операции по обработке фотоматериала, измерениям пространственных координат, построению модели и карты помещения.

Технология съемки загрязненных помещений объекта «Укрытие» проста в исполнении и максимально снимает дозовые нагрузки на персонал при последующих технологических операциях. Обучение навыкам работы с предлагаемой технологией не требует специальных знаний и подготовки персонала.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 134—142

ВИРІШЕННЯ ТЕМАТИЧНИХ ЗАДАЧ. Геологічні задачі

Комплексні аерокосмогеологічні дослідження території Зони відчуження ЧАЕС і прилеглого району Коростенського плутону при виборі локальних площадок, придатних для глибинного депонування радіоактивних відходів

О. Т. Азімов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

В останні десятиліття матеріали дистанційних зйомок (МДЗ) усе ширше й інтенсивніше використовуються при уточненні і деталізації основних рис структурно-геологічної будови регіонів. Вони володіють високою щільністю вихідної інформації на одиницю площі і можливістю оперативно, неначе єдиним поглядом оцінити ландшафтні особливості денної поверхні великих територій з порівняно незначними фінансовими витратами.

Вивчення структурних особливостей районів за допомогою аерокосмічних зйомок земної поверхні базується на уявленнях про успадкованість сучасних і новітніх тектонічних рухів від попередніх етапів розвитку земної кори. Тому основні компоненти сучасного ландшафту (рельєф, гідромережа, літологічний склад четвертинних відкладів, грунтово-рослинний покрив і т. д.) відображають (звичайно, у деякому наближенні) основні риси внутрішньої будови геологічного середовища.

Застосування аерокосмічних методів з метою вибору і обгрунтування ділянок, сприятливих для захоронення радіоактивних відходів (РАВ) у глибинних геологічних формаціях, які є найнадійнішим природним барєром розповсюдження радіоактивності, передбачається на регіональному і детальному етапах досліджень. Найбільш придатними з дистанційних методів для цього є [1]:

1) структурне, ландшафтно-геоморфологічне і геоіндикаційне дешифрування аерокосмознімків видимого діапазону електромагнітних хвиль для виділення лінеаментних зон, які пов'язані з розломами у земній корі;

2) дешифрування знімків у інфрачервоному діапазоні з метою виявлення активних флюїдопровідних структур;

3) дешифрування МДЗ у радіохвильовому діапазоні, що дозволяє виділяти зони розущільнення у гірських породах, визначати ступінь їх вологонасиченості, глибини залягання грунтових вод;

4) аналіз спектрів відбиття рослинності за багатозональними МДЗ у зонах тектонічних порушень (картування гетерогенної будови останніх щодо флюїдопроникності).

Оцінка розвитку флюїдогеодинамічних процесів на новітньому і сучасному етапах тектогенезу найбільш об'єктивно і ефективно виконується шляхом комплексування різних видів дистанційних зйомок з наземними геофізичними, геохімічними і гідрогеологічними роботами, а також неотектонічними і морфометричними побудовами, кількісним лінеаментним аналізом. Спільне їхнє застосування і моделювання процесів енергомасообміну на основі отриманих даних дозволяє уточняти і деталізовувати особливості розломно-блокової будови територій, виділяти відносно стабільні, монолітні блоки земної кори, які за своїми геометричними розмірами є задовільними для створення сховищ РАВ, проаналізувати безпеку останніх з позицій неотектоніки, а також виявляти несприятливі для захоронення ділянки розвитку гірських порід з передбачувано високими фільтраційно-ємнісними властивостями.

Запропоновані методичні підходи застосовувались при дослідженні особливостей геологічної структури території Зони відчуження (ЗВ) ЧАЕС і прилеглого до неї району Коростенського масиву

© О. Т. АЗІМОВ, 2002

кристалічних порід. Враховуючи незначну геолого-геофізичну вивченість території досліджень, матеріали аерокосмічних зйомок (МАКЗ) слугують додатковим джерелом інформації про основні риси тектонічної будови регіону. У процесі дешифрування МДЗ послідовно-паралельно були проаналізовані, вивчені і дешифровані наявні матеріали космічної зйомки, аерофотозйомки, а також топографічні карти масштабів від 1:200 000 до 1:50 000.

З матеріалів космічної зйомки використовувались фотографічні інтегральні космічні знімки (КЗ) з супутника серії «Космос» (20.07.1976 р.) масштабу 1:1 000 000, збільшені до масштабу 1:200 000, радіолокаційні КЗ з супутників ERS-1 (25.08.1992 р., 10.08.1993 р.) і «Shuttle» (01.10.1994 р.), багатозональні сканерні КЗ з супутників «Landsat» (07.09.1977 р., 14.04.1984 р., 31.05.1986 р., 29.05.1988 р. і 02.10.1999 р.), «Spot» (14.07.1998 р.) та ін.

Виходячи з того, що для цілей структурного і геоіндикаційного дешифрування закритих територій доцільно застосовувати дистанційні знімки раннього весняного або пізнього осіннього періодів року, бо вони несуть у собі найбільш повні і чіткі ландшафтні індикатори структурних форм, були опрацьовані матеріали повітряної інтегральної фотозйомки, проведеної у 1976, 1979 і травні 1986 року. Виходячи з очікуваної розмірності локальних структурних елементів кристалічного фундаменту і осадового чохла, найповніше використовувалися виготовлені з матеріалів контактного друку накидні монтажі масштабу 1:220 000, фотосхеми масштабів 1:100 000, 1:50 000, 1:40 000, а для виявлення дистанційних образів структур, їхніх геоіндикаторів у ландшафті і набору допоміжних (морфологічних, морфометричних) пошукових показників — аерофотознімки (АФЗ) крупнішого масштабу: 1:12 000—1:14 000.

При дослідженнях виконувалося структурне і ландшафтно-геоіндикаційне дешифрування МАКЗ, яке передбачало послідовне вирішення наступних задач [2, 3]: 1) оцінка взаємозв'язку між особливостями будови сучасного ландшафту, фізичними полями і структурою докембрійського фундаменту і осадового чохла території робіт; 2) визначення характерних для даних ландшафтно-геологічних умов геоіндикаторів її внутрішньої структури, які відображають напружено-деформаційний стан складових шарів; 3) кількісний лінеаментний аналіз результатів дешифрування МДЗ та топографічних карт з метою оцінки тріщинуватості гірських порід; 4) уточнення структури району, який вивчається, та аналіз характеру деформацій за різноорієнтованими розломами на основі використання МАКЗ та накопичених апріорних геолого-геофізичних даних.

Характерною особливістю території досліджень є невисокий рівень збереженості природних ландшафтів. У звязку з цим основна роль при геоіндикаційних дослідженнях відводилась компонентам ландшафту, які у меншій мірі піддалися антропогенному перетворенню і разом з тим є достатньо фізіономічними та інформаційними. Головним чином це рельєф і рельєфоутворюючі процеси. Певні ділянки району досліджень (заплави річок, ерозійна мережа, перші надзаплавні тераси, заболочені ділянки вододілів, лісові масиви природного походження тощо) у значній мірі не зачеплені господарською діяльністю людини, що дало можливість у їхніх межах враховувати всі компоненти ландшафту. Повсюдно при геоіндикаційних дослідженнях вивчалися грунти — хоча й деципієнтний, проте достатньо інертний до змін сучасними геологічними процесами (у звязку з господарською діяльністю людини) компонент ландшафту.

При вивченні розривних деформацій найбільшої уваги заслуговував аналіз результатів структурного дешифрування, спрямованого на виділення показників дистанційних образів, які індикують різнопорядкові глибокозалягаючі плікативні і дизюнктивні структурні форми кристалічного фундаменту й осадового чохла (рис. 1). Даний вид дешифрування виконувався у два етапи. На першому етапі проводився аналіз лінійних обєктів — лінеаментів, що утворюють складну мережу. Всі лінійні елементи на МДЗ виявлені за прямими (колір (тон), малюнок (форма) і розміри) і непрямими (рельєф, ерозійна мережа, рослинність, типи грунтів та ін.) ознаками. Утворення зон концентрації субпаралельних лінеаментів часто не пов'язане ні з літологією, ні з рельєфом. Вони простягаються, перетинаючи як різні геологічні структури, так і різні форми рельєфу (річкові долини і вододіли), і обумовлені наявністю сучасних зон напружено-деформаційного стану гірських порід.

Окремі передбачувані структурні елементи геологічного середовища дизюнктивного характеру у межах ЗВ і прилеглого до неї району Коростенського плутону на знімках високого просторового розрізнення і топоматеріалах визначалися за цілою низкою ознак (геоіндикаторів): границі ділянок з різним ступенем розчленованості рельєфу і динамікою ерозійних процесів, спрямлені ділянки границь гіпсометричних сходин, градієнтних уступів у рельєфі, річкових долин, берегів озер і боліт, ерозійної мережі, улоговин, потяжин, промоїн, вододілів, колиноподібні вигини русел водотоків і долин, лінійно витягнуті ланцюжки суфозійних просідань, мікрозападин, ерозійно-денудаційних останців, піщаних гряд, а також межі комплексів четвертинних відкладів і їхніх літофацій та відрізки з розвитком специфічних фацій

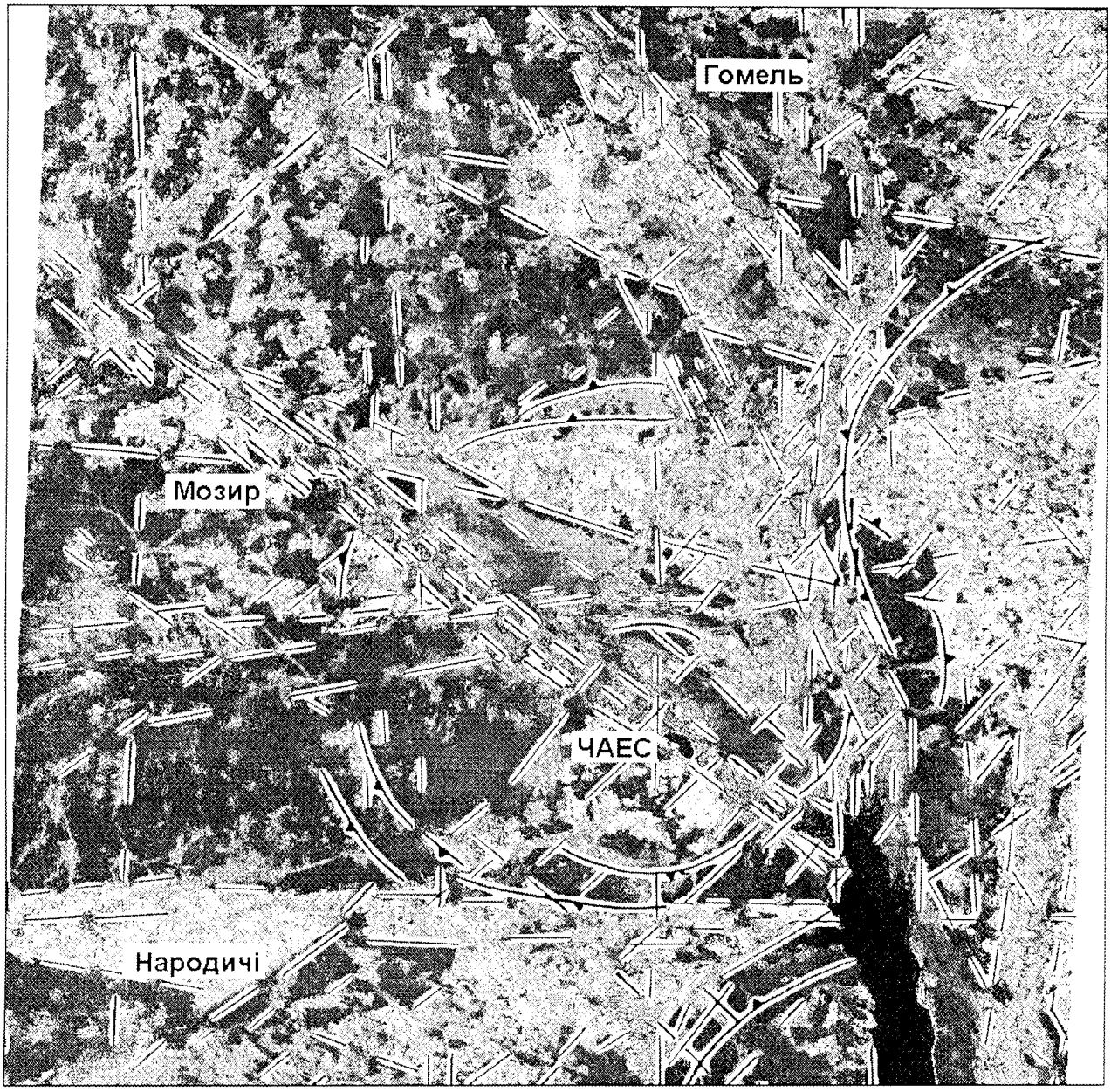


Рис. 1. Оглядовий синтезований багатозональний космічний знімок «Landsat MSS» (07.09.1977 р.) території Зони відчуження ЧАЕС та прилеглих районів з елементами регіонального структурного дешифрування

гігрофільної рослинності тощо, які на МДЗ здебільшого проявляються протяжними лініями аномальної зміни фототону зображення.

Ці лінеаменти опосередковано характеризують внутрішню геологічну будову і гідрогеологічні особливості району робіт. При їхній інтерпретації територія досліджень розділялася за типами рельєфу або за видовими характеристиками ландшафту, тому що у різних ландшафтних умовах подібні форми можуть по-різному інтерпретуватися, тобто бути чи не бути індикаторами глибинної будови.

Застосування масштабного ряду фотознімків у процесі структурного дешифрування забезпечувало виявлення корисної структурної інформації при розбраковці аномалій (лінійних і площинних). Використання дрібномасштабних КЗ давало можливість простежити різні передбачувані дизюнктивні і плікативні структурні форми, а крупномасштабних

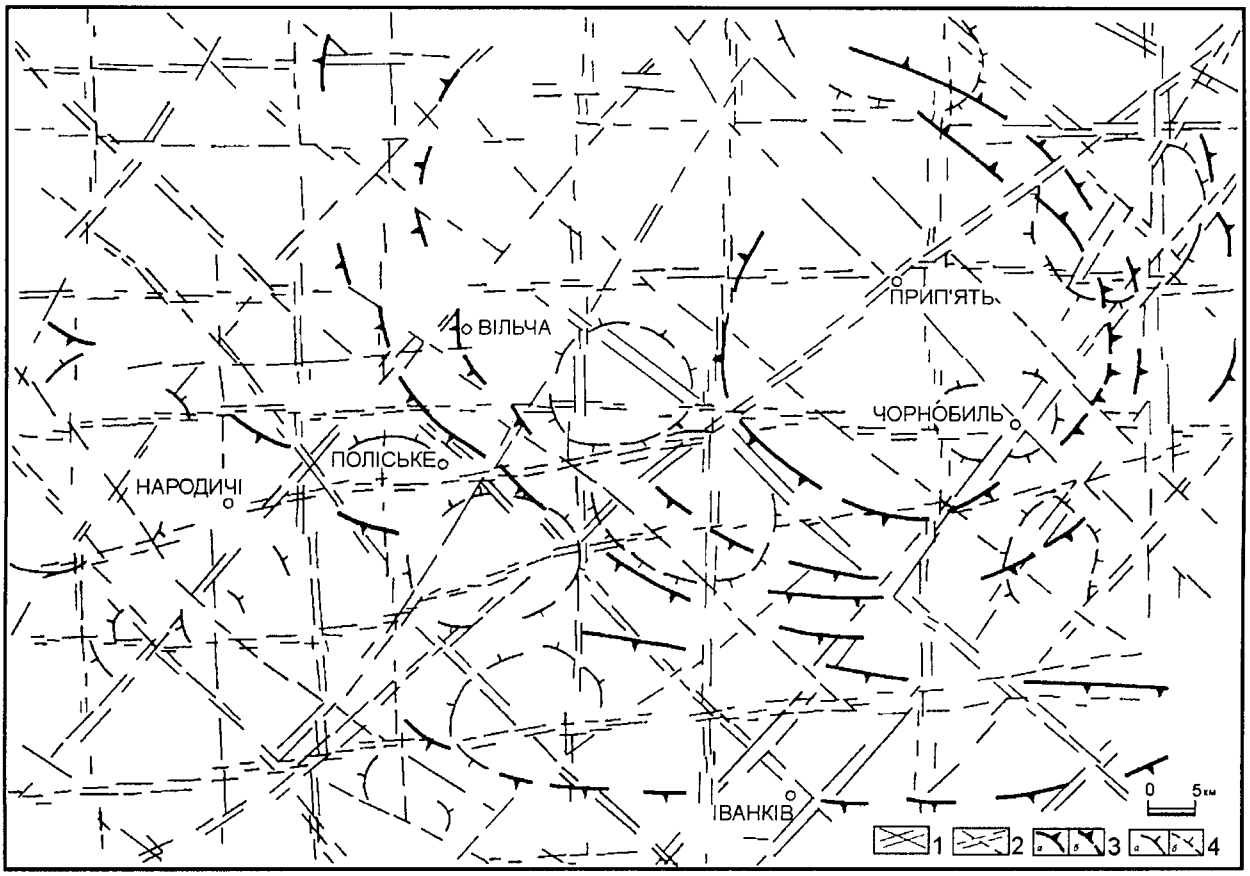


Рис. 2. Схема основних лінеаментів та кільцевих структур території Зони відчуження і прилеглого району Коростенського плутону (за результатами дешифрування матеріалів дистанційних зйомок): *1*, *2* — лінеаменти і їх зони, які відображають розломно-блоковий каркас кристалічного фундаменту і осадового чохла (*1* — впевнено виділені, *2* — невпевнено виділені), *3* — контури кільцевих і дугоподібних елементів ландшафту, дешифрованих на КЗ високого рівня генералізації, які імовірно відображають повязані з підкоровим магматизмом структури (а — впевнено виділені, б — невпевнено виділені), *4* — криволінійні елементи ландшафту, які иявлені на середньо- і крупномасштабних КЗ і відображають активізовані на новітньому етапі блоки кристалічного фундаменту (а — впевнено виділені, б — невпевнено виділені)

— провести деталізацію і уточнення. Ретельне дешифрування АФЗ і карто-схем «стисненого рельєфу» на основі аналізу структурно-індикуючих показників (морфографічного, гіпсометричного) сприяло вивченню особливостей різних геологічних елементів. Наприклад, виділенню сучасних поверхневих тріщин (структурних ліній, або елементарних лінеаментів).

Отримана у процесі дешифрування схема лінеаментного поля відрізняється великою насиченістю у показі лінеаментів (рис. 2), тому безпосередня ідентифікація по них розривних порушень ускладнена. Беручи до уваги різні аспекти визначення і класифікації лінеаментів, розглянуті у роботах [4—14], для встановлення закономірностей у розподілі за рангами проводилася їхня типізація у відповідності з ознаками прояву на дистанційних знімках або місцевості, їхнім відношенням до геологічних обєктів, простяганням, шириною та ін.

При плановому зіставленні структур, які прогнозувалися за результатами дешифрування МАКЗ і виділялися геолого-геофізичними методами, відмічалися такі випадки: результати різних методів повністю збігалися одне з одним, лише частково збігалися, або зовсім не збігалися. Часткова незбіжність місцеположень і простягань обєктів, встановлених різними методами, може свідчити про незбіжність структурних планів. При цьому результати дешифрування МДЗ перш за все відображають новітній структурний план, дані сейсморозвідки МСГТ — структурні плани окремих горизонтів осадового чохла, матеріали граві- і магніторозвідки — головним чином особливості будови фундаменту. Висока корельованість результатів різних методів

зазвичай свідчить про успадкованість у розвитку структурних форм.

Причини незбіжності можуть бути обумовлені особливостями геологічної будови території, характером співвідношення структурних планів, ступенем вивченості обєктів. При цьому мали місце випадки, коли аналоги геофізичних аномалій були відсутні на схемі результатів дешифрування МАКЗ, або, навпаки, дані дешифрування не знаходили відображення на геолого-геофізичних матеріалах.

При віднесенні лінеаментів до розломів враховувалися основні закономірності у проявах розривних порушень. Останні звичайно проявляються у вигляді смуг підвищеної щільності дрібніших оперяючих розривів і тріщин, які простягаються вздовж основних розломів, що, у свою чергу, можуть складатися з кількох зчленованих кулісоподібних гілок. Такі смуги називають зонами розломів [4, 7]. Їхнє виявлення — одна з задач структурного дешифрування, бо вони звичайно пов'язані з складчастими структурами і флексуроподібними вигинами порід.

Звичайно зони лінеаментів ширші за зони розломів, виявлених геолого-геофізичними методами, які вони відображають. Останні просторово знаходяться у середині лінеаментних зон. Це давало змогу уточнювати області аномального геодинамічного впливу розломів, активізованих на новітньому етапі розвитку земної кори, що особливо важливо при вирішенні задачі вибору місць глибинного поховання РАВ.

Інформативною виявилася й компютерна обробка лінеаментного поля для визначення просторової організації лінійних елементів. Зокрема встановлено, що у межах ЗВ лінеаменти групуються у 8 одномодальних систем шириною від 17 до 27°: північно-західного спрямування з азимутами простягання 297—322° та 322—340°, субмеридіонального — 340—357° та 357—22°, північно-східного — 22—45° та 45—70°, субширотного — 250—277° та 277—297°. Вони добре збігаються з системами розломів України, встановленими за різними методами [15, 16]. У кожній парі систем лінеаментів, як і у систем розломів, одна виражена чіткіше за іншу. Так, чіткіше представлені системи лінеаментів за напрямками 297—322°, 357—22°, 45—70° і 277—297°.

Аналіз схем щільності лінеаментів чотирьох систем, які відобразилися найчіткіше, показав, що всі вони мають багато спільного. На усіх схемах виділяються яскраво виражені лінійні зони підвищених та максимальних значень щільності різної довжини, які збігаються з відомими розломами. Ці зони, як правило, орієнтовані згідно з модальними значеннями розподілів азимутів простягання лінеаментів. Поряд з цим зустрічаються й поперечні структури, спрямовані під кутом, близьким до прямого, до структур головного простягання. Такі елементи виникають як у місцях згущення окремих поздовжніх максимумів, так і відповідають зонам зсуву. Однак останнє потребує додаткових спеціальних досліджень.

Побудовані схеми щільності лінеаментів різних систем практично не відрізняються від карт фізичних полів, які аналізуються геофізиками. Тому для їхньої обробки та аналізу можуть використовуватись прийоми, які застосовуються у геофізиці. Це, перш за все, поглиблює аналіз отриманих матеріалів та підвищує об'єктивність і достовірність результатів.

Встановлені розбіжності у характері розподілу елементів ландшафту, які характерні для лінеаментів різних систем, ймовірно, пов'язані з характером тектонічних деформацій за різноорієнтованими розривними порушеннями. У межах окремих розломів характер розподілу різних індикаторів лінеаментів також нерівномірний. Аналіз даного просторового розподілу дозволяє визначити розкритість структур на окремих ділянках, що необхідно для оцінки тріщинної проникності порід.

Таким чином, встановлені розривні порушення являють собою каркас тектонічної структури досліджуваної території, а рухи за ними визначають утворення локальних блоків, піднять. При дешифруванні МАКЗ намітився загальний рисунок мережі розривних порушень і окреслилися області аномального геодинамічного їх впливу, виявилися окремі локальні розриви. Ці дані лягли в основу структурно-тектонічного районування території досліджень масштабу 1:200 000 (рис. 3).

За нашими даними [1—3] район робіт розташований у межах зони перетину двох великих регіональних структур субмеридіонального та субширотного простягання. Субмеридіональна структура відповідає відомій Одесько-Брусилівській зоні глибинних розломів, яка, починаючи з архею, мала вплив на будову Українського щита у цілому. Вона контролює численні прояви гідротермально-метасоматичних процесів. Формування зони розломів пов'язане з глибокою перебудовою земної кори.

На площі ЗВ у межах Одесько-Брусилівської зони глибинних розломів виділяються обмежуючі її регіональну структуру Брусилівське та Одесько-Тальнівське порушення. Крім того, у межах зони встановлено ще кілька структур вищого порядку. Всі лінійні об'єкти субмеридіонального простягання у більшості випадків погано дешифруються на МАКЗ, кожна з них має відносно невелику протяжність.

За даними оглядових космічних матеріалів субширотна структура у регіоні простежується далеко на захід, фактично до узбережжя Атлантичного

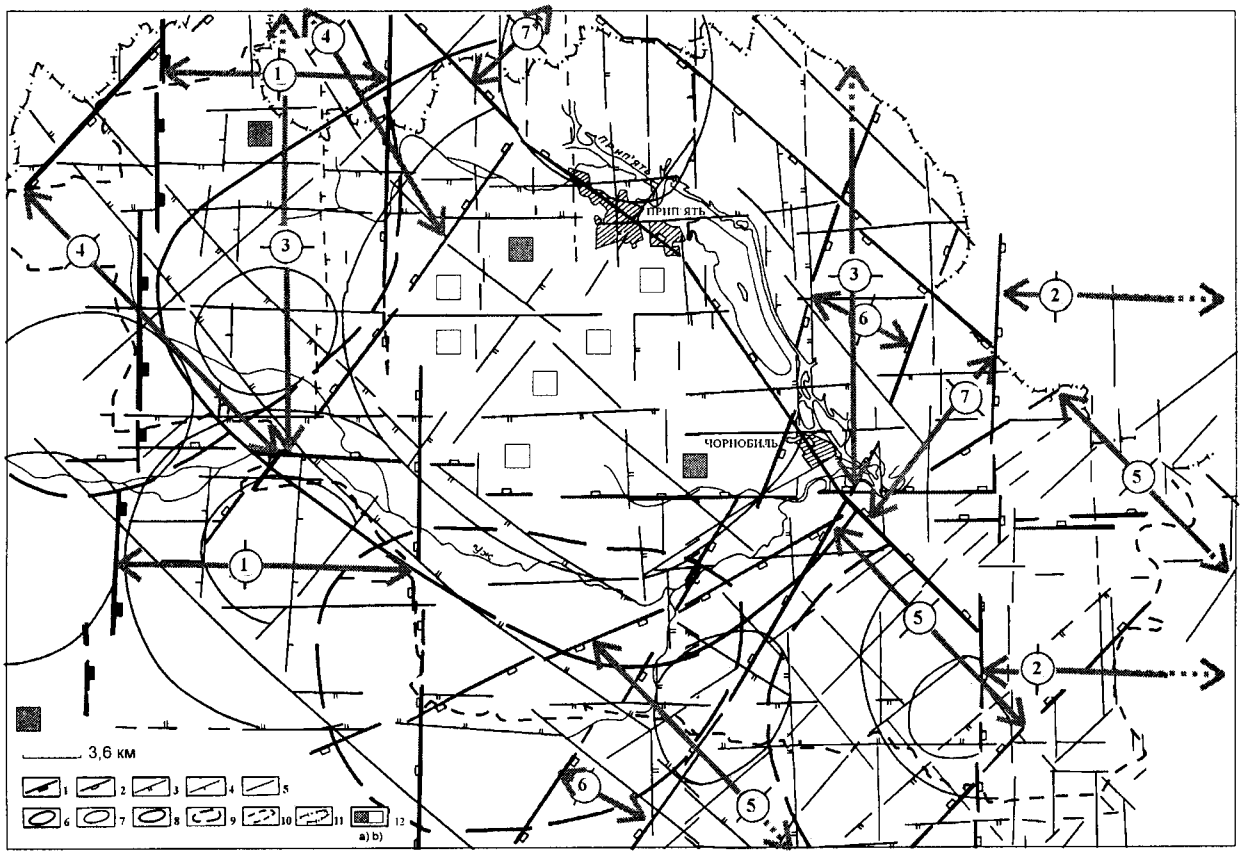


Рис. 3. Структурно-тектонічна схема території Зони відчуження (за результатами дешифрування матеріалів дистанційних зйомок): *1—4* — розломи, які обмежують структури (*1* — I-го порядку, *2* — II-го порядку), *3* — III-го порядку, *4* — IV-го порядку, *5* — інші розломи, *6—9* — кільцеві структури (*6* — I-го порядку, *7* — II-го порядку, *8* — I-го порядку достовірні, *9* — I-го порядку передбачувані), *10* — границя ЗВ, *11* — державний кордон України, *12* — ділянки, сприятливі для глибинного поховання РАВ (а — найбільш сприятливі, б — сприятливі). Назви розломів (цифри у кружках): *1* — Брусилівський, *2* — Одесько-Тальнівський, *3* — Північно-Українська горстово-грабенова зона розломів, *4* — Тетерівський-I, *5* — Тетерівський-II, *6* — Брагінський, *7* — Південний прибортовий (Прип'ятський)

океану, а також на схід. Без сумніву, це регіональний глибинний розлом. У межах даної структури розміщується Північно-Українська горстово-грабенова зона [17]. Ця структура має дуже складну будову, вона пройшла складний шлях розвитку. Вертикальні переміщення порід по структурі відбувалися починаючи з рифею, протягом всього фанерозою, включаючи неотектонічний та сучасний етапи розвитку.

Субширотні лінійні об'єкти зустрічаються по всій території досліджень. Вони відносно рівномірно розташовані на всій її площі, так що встановити межі між ними досить складно. На МАКЗ і топографічних картах вони впевнено відображаються, легко дешифруються, а відповідні їм індикатори мають значну протяжність.

Ще однією крупною структурою, хоч і меншою, ніж описані вище, є Тетерівська північно-східного простягання, яка відповідає Тетерівській зоні глибинних розломів. Це система мантійних розломів, сформованих у ранньому докембрії з багаторазовою тектонічною активізацією, включаючи неотектонічний етап розвитку. Обмежують її розломи: Тетерівський-I і Тетерівський-II. Вздовж першого з них спостерігається зміна характеру магнітного та гравітаційного полів. З розломом Тетерівський-II збігаються ланцюжки локальних аномалій магнітного та гравітаційного полів.

Окрім Тетерівської зони розломів, у межах ЗВ виділяється Брагінське порушення північно-східного простягання, що перетинається з Тетерівською зоною під гострим кутом у північно-східній частині району робіт. Воно не відобразилося у магнітному та гравітаційному полях, що не дає змоги віднести його до глибинних розломів. На КЗ та топокартах північно-східні розломи впевнено фіксуються за комплексом індикаторів, які мають значну протяжність.

Серед структур північно-західного простягання на території досліджень найбільш значною є Південний прибортовий (Прип'ятський) розлом, який просторово збігається з долиною однойменної річки (рис. 1, 3). Він чітко відобразився у полі сили тяжіння, яке перераховане на висоту 1.5 та 10 км, що дає підставу віднести його до структур глибокого закладення. Визначаючи межу між структурами Українського щита та Дніпровсько-Донецької западини, даний розлом відігравав важливу роль у геологічній історії регіону. Переміщення порід за даним розломом відбувалися на новітньому та сучасному етапах розвитку. У сучасному рельєфі розлом відокремлює відносно підняту (південно-західну) частину ЗВ від відносно опущеної (північно-східної).

Крім Прип'ятського, кілька дрібніших розломів цього ж простягання встановлено на заході і північному заході району робіт. За результатами дешифрування МАКЗ та топографічних карт північно-західні розломи добре виділяються за комплексом індикаторів і мають досить значну протяжність. На відміну від структур субширотного та субмеридіонального напрямків, північно-західні і північно-східні структури мають чіткі межі.

Виходячи з довжини розривних порушень різного напрямку, їхнє відображення у сучасному ландшафті ЗВ і прилеглого району Коростенського плутону, характеру розподілу розломів по площі, особливостей їхньої будови та за аналогією з іншими регіонами Українського щита та Східно-Європейської платформи (СЄП), дизюнктиви субмеридіонального спрямування віднесені нами до структур розтягування, за якими відбувалося опущення шарів земної кори. Субширотні порушення є типовими структурами стиснення, за якими відбувалися підйоми порід зі значною амплітудою, про що свідчать дані геологічних досліджень. Структури північно-східного та північно-західного напрямку — це структури сколу, на що вказує характер їхнього відображення у елементах ландшафту.

Отже, формування сучасних розломів території досліджень відбувається в умовах субмеридіонального стиснення та субширотного відносного розтягування. Аналогічний характер орієнтування тектонічних напруг встановлено й у інших районах Українського щита та СЄП.

Другий етап структурного дешифрування МАКЗ полягав у виділенні кільцевих (дугових, овальних) утворень, які здебільшого відповідають структурам докембрійского фундаменту і плікативним дислокаціям осадового чохла. Дані обєкти обумовлені зображенням дугових елементів рельєфу і різноманітних компонентів ландшафту, які закономірно поєднуються (рис. 1). Як і для лінеаментів, характерною їхньою властивістю є повсюдний розвиток: вони спостерігаються у межах різних структурно-тектонічних елементів району, який вивчається. Друга важлива особливість кільцевих утворень — їхня дискордантність щодо вміщуючих структур.

При структурному дешифруванні розрізнялося декілька морфологічних типів кільцевих утворень (рис. 2): 1) власне кільцеві утворення, які мають форму кілець різної ширини; 2) кільцеві концентричні утворення, що мають різні радіуси, але єдиний центр; 3) кругові утворення, тобто ділянки круглуватих обрисів.

Виходячи з розмірів встановлених кільцевих структур, вони поділяються на два порядки. Генезис цих об'єктів викликає суперечки. Природно, розмір ендогенного кільцевого об'єкта є функцією глибини енергетичного імпульсу, який викликав його утворення. Без сумніву, кільцеві структури території досліджень є активними формуваннями на сучасному тектонічному етапі її розвитку. Вони мають значний вплив на тріщинну проникність гірських порід.

Найбільш чітко вираженою кільцевою структурою району робіт є розташована у його центрі Чистогалівська (або Припятсько-Корогодська [12]). Центральна частина даної структури розміром 35 × 40 км (рис. 1, 3) з півдня обмежена долиною річки Уж, з заходу та півночі — долинами річок Ілля (частково) та Сахан відповідно. Зі сходу вона обмежена розломом, який збігається з долиною р. Припять. Центр структури характеризується максимальними значеннями відміток денного рельєфу.

Можна припустити, що даний обєкт сформувався під дією сил, спрямованих вертикально до поверхні землі, тобто аналогічно формуванню складок поперечного згину. Згідно з польовими та експериментальними дослідженнями [18, 19] по периферії таких структур формуються зони розтягу. Останнє підтверджується розвитком по межі кільцевого утворення долин річок Уж, Ілля та Сахан. Напруги, які виникають у процесі формування структури, хоча і носять локальний характер відносно всієї ЗВ і прилеглого до неї району Коростенського масиву кристалічних порід, але впливають на особливості деформацій під дією регіональних напруг. Характер розподілу останніх у межах кільцевої структури підвищуватиме проникність тріщин усіх напрямків відносно тих з них, які розташовані за її межами.

Таким чином, проведеним комплексом досліджень з застосуванням МДЗ встановлено, що у цілому сітка лінеаментів і їхніх зон відображає регіональний геотектонічний розломно-блоковий каркас кристалічної основи й осадового чохла, який визначає загальний структурний план території ЗВ і прилеглого до неї району Коростенського плутону та схему розташування у їхніх межах окремих геологічних обєктів. Кільцеві структури головним

чином відображають обємно-площинні неоднорідності земної кори.

Як зазначалося вище, аналіз просторової організації виявлених розривних порушень і кільцевих структур, областей аномального геодинамічного впливу дозволив виділити блокові поля району робіт. Зважаючи на тематичне спрямування досліджень, особливу увагу було звернуто на відносно стабільні, монолітні блоки земної кори, відображення яких у ландшафті денної поверхні характеризується низьким ступенем розчленованості рельєфу і динамікою сучасних ерозійних процесів. У межах даних блоків відсутні річки, інші постійно діючі водотоки, градієнтні уступи у рельєфі тощо. Тому за результатами дешифрування МАКЗ і топографічних карт для них притаманні мінімальні значення щільностей дискретних ліній сучасної поверхневої тріщинуватості (структурних ліній), які у сукупності являють собою поле елементарних лінеаментів. Зокрема, у межах ЗВ було виділено 9 подібних ділянок (рис. 3), за межами ЗВ — 4.

З-поміж ділянок перевага віддавалася тим, які на сучасному етапі розвитку зазнають певного опускання (або незначного порівняно з оточуючими піднімання), що проявляється розвитком площинного заболочування, наявністю дрібних озер, невеликих водойм, рівномірно розташованих мікрозападин і суфозійних просідань та ін. внаслідок безстічного характеру поверхневих вод. На МАКЗ, зокрема, вони індикуються наявністю характерних грунтово-геоботанічних ознак, які переважно відрізняються темнішим фототоном.

Передбачається, що у межах площ, які розглядаються, переважає низхідний тепломасопереніс, що є найбільш сприятливим при розташуванні довгострокових сховищ РАВ у глибинних геологічних формаціях. При інших рівних умовах пріоритетними вважалися блоки, які знаходяться на віддалі кількох кілометрів від зон сучасної активізації розривних порушень, вузлів їхнього перетину, оскільки останні є ділянками розвитку гірських порід з передбачувано високими фільтраційно-ємнісними властивостями, несприятливими для поховання потенційно небезпечних об'єктів. Перевага також віддавалася блокам, які за своїми геометричними розмірами підходять для створення сховищ РАВ. Як правило, у плані це багатокутники із відстанями між протилежними сторонами у декілька кілометрів.

Таким чином, на основі аналізу результатів дешифрування МАКЗ території досліджень всі виявлені ділянки щодо їх придатності для будівництва сховищ РАВ у глибинних геологічних формаціях за комплексом особливостей сучасного геодинамічного стану були класифіковані на три класи: 1) найсприятливіші; 2) сприятливі; 3) менш сприятливі. При цьому найбільш сприятливими з точки зору неотектоніки і сучасної активізації є наступні ділянки: за межами ЗВ — між с. Народичі і с. Малі Кліщі, між с. Вовчків і с. Вересня, а у межах ЗВ — в 4 км на північ від с. Красне, між с. Буряківка і с. Чистогалівка та у районі с. Запілля. Однак виділені перспективні площадки для поховання РАВ вимагають подальшої деталізації, для чого необхідне додаткове опрацювання МАКЗ і спільна інтерпретація результатів їхнього дешифрування з апріорними даними геолого-геофізичних робіт.

1. Азімов О. Т., Лялько В. І., Ходоровський А. Я. та ін. Використання матеріалів аерокосмічної зйомки при виявленні ділянок, перспективних для захоронення РАВ у Зоні відчуження // Экологические проблемы захоронения радиоактивных отходов: Тез. докл. междунар. конф., Киев, 9—10 марта 2000 г. — Киев: ГНЦ РОС НАН и МЧС Украины, 2000.—С. 40.
2. Азімов О. Т. Вивчення тектонічних особливостей території Зони відчуження за результатами дешифрування матеріалів аерокосмічних зйомок з метою виділення ділянок, сприятливих для підземної ізоляції РАВ // Пятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання: Тез. доп. міжнар. конф., Київ, 18—20 квітня 2001 р. — Киев: ЄЦТБ, 2001.—С. 134.
3. Азімов О. Т. Дослідження тектонічних особливостей району Коростенського масиву кристалічних порід та території Зони відчуження ЧАЕС за даними дешифрування аеро- і космознімків з метою вибору перспективних площадок для глибинного захоронення РАВ // Сб. науч. тр. НГА Украины.—2001.—№ 12.—С. 284—289.
4. Кильдюшевский Е. И. Разрывные нарушения и полезные ископаемые (к использованию дистанционных методов поисков). Обзор ВИЭМС. — М., 1979.—52 с.
5. Козлов В. В. Космогеологические исследования систем разломов. Обзор ВИЭМС. — М., 1982.—55 с.
6. Козлов В. В., Перминова В. Н., Сулиди-Кондратьев Н. Д. Применение дистанционных методов для решения различных геологических задач за рубежом. Обзор ВИЭМС. — М., 1982.—55 с.
7. Космическая информация в геологии / Под ред. В. Г. Трифонова и др. — М.: Наука, 1983.—534 с.
8. Кац Я. Г., Полетаев А. И., Румянцева Э. Ф. Основы линеаментной тектоники. — М.: Недра, 1986.—140 с.
9. Тектоника нефтегазоносных областей юго-запада СССР (Объяснительная записка к Тектонической карте нефтегазоносных областей юго-запада СССР с использованием материалов космических съемок; масштаб 1:500 000) / Р. Г. Гарецкий, В. В. Глушко, Н. А. Крылов и др. — М.: Наука, 1988.—85 с.
10. Тарангул Д. А., Азимов А. Т., Седлерова О. В. Перспективы поисков нефти и газа в кристаллических породах фундамента по данным аэрокосмогеологических исследований в пределах Лебединско-Юльевской зоны поднятий северного борта Днепровско-Донецкой впадины // Проблемы нефтегазоносности кристаллических пород фундамента Днепровско-Донецкой впадины. — Киев: Наук. думка, 1991.—С. 85—89.
11. Азимов А. Т., Тарангул Д. А. Поиски нефти и газа в пределах Тростянецко-Юльевской зоны поднятий с помощью детальных аэрокосмогеологических исследований // Аэрокосмогеологические исследования в комплексном решении нефтегеологических задач (опыт, эффективность, проблемы). — М.: ИГиРГИ, 1992.—С. 89—93.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 142—143

12. Верховцев В. Г., Потапчук И. С., Верховцева Л. Ф. и др. Линейные и кольцевые морфоструктуры междуречья Припять-Уж-Тетерев (в пределах 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС) // Тектоника и стратиграфия.—1993.—Вып. 33.—С. 37—41.
13. Азімов О. Т. Розривні деформації зовнішніх прибортових ділянок центральної частини Дніпровсько-Донецької западини (за комплексом дистанційних і геолого-геофізичних даних): Автореф. дис. ... канд. геол. наук. — Киев, 1996.—21 с.
14. Азімов О. Т. Принципи комплексного аналізу та інтерпретації геолого-геофізичних даних і результатів дешифрування матеріалів аерокосмічних зйомок // Проблемы и перспективы использования геоинформационных технологий в горном деле: Докл. III Междунар. научно-практической конф. «Проблемы геоинформатики при комплексном освоении недр», Днепропетровск, 29—31 октября 2001 г. — Днепропетровск: РИК НГА Украины, 2001.—С. 94—100.
15. Чебаненко І. І. Розломна тектоніка України. — Киев: Наук. думка, 1966.—179 с.
16. Чебаненко И. И. Теоретические аспекты тектонической делимости земной коры (на примере Украины). — Киев: Наук. думка, 1977.—84 с.
17. Гойжевський О. О. Північно-Українська горстово-грабенова зона у межах Українського щита // Геол. журн.—1972.—32, вып. 5.—С. 81—88.
18. Белоусов В. В., Гзовский М. В. Экспериментальная тектоника. — М.: Недра, 1964.—119 с.
19. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. — М.: Наука, 1975.—536 с.

Тектонічна активність осадових басейнів як закономірний етап їхнього розвитку

В. Г. Пазинич, Н. В. Пазинич

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Проблема тектонічної активності як осадових басейнів у цілому, так і окремо взятих локальних структур можна віднести до найцікавіших природних феноменів, остаточне вивчення якого вимагає ще немалих зусиль. У даній роботі ми пропонуємо розглянути деякі аспекти «енергозабезпечення» тих процесів, які відбувають в осадовій товщі. На нашу думку, ці ідеї дають можливість подивитися на процеси формування покладів вуглеводнів дещо під іншим кутом зору.

Накопичення в осадовій товщі неокисленої органічної речовини, кількість якої у середньому складає 2—10 %, а у деяких типів відкладень і значно більше [1], є своєрідним видом «палива», наявність якого забезпечує у майбутньому розвиток тектонічних процесів. Цікавим є те, що органічна речовина як джерело енергії для тектонічних процесів виступає вже від початку трансформації у рідкі та газоподібні вуглеводні, коли осадові верстви занурилися на певну глибину, а температура і тиск досягли відповідних значень. Після перетворення органічної частини у вуглеводні, які мають меншу питому вагу, об'єм гірських порід неминуче збільшиться. Якщо прийняти, що в осадах було тільки 5 % органічної речовини з питомою вагою приблизно 1—1.2 г/см^3, то це значить, що після її трансформації в нафту з питомою вагою приблизно 0.85 г/см^3 об'єм гірських порід повинен збільшитися приблизно на 2 %. Це значить, що товща з початковою потужністю 100 м розбухне на 2 м, а кілометрова товща — на 20 метрів. При більшій кількості органіки, або при її трансформації у газ ця величина буде ще більшою, але кількісне співвідношення у випадку з газом буде значно складнішим, що обумовлюється його поведінкою в умовах високих тисків та температур (стискання, розчинення, конденсація). Причому це «розбухання» носитиме регіонально диференційований характер, воно охопить як увесь басейн у цілому, так і його окремі ділянки, що визначатиметься неоднорідністю геологічної будови, а також геостатичного навантаження.

Неоднорідність геологічної будови, яка зокрема характеризується чередуванням флюїдостійких та флюїдопроникних верств, наявністю тектонічних порушень обумовлює можливість горизонтальної та вертикальної міграції вуглеводнів. Наявність же ембріональних складок обумовлює їхню початкову концентрацію, яка врешті-решт призводить до виникнення саморозвитку геосистем [2] і формування покладів вуглеводнів. Певне значення для формування таких систем має зміна геостатичного навантаження, що в першу чергу залежить від екзогенних процесів, зокрема водної ерозії та дефляції [3]. Схема взаємодії дефляції з ендогенними чинниками є досить цікавою, але і громіздкою, що не дозволяє навести її у даній публікації, тому ми тут даємо тільки посилання.

Для теорії та практики дистанційних методів суттєвою у вищенаведеному є та обставина, що

© В. Г. ПАЗИНИЧ, Н. В. ПАЗИНИЧ, 2002

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 143—148

більшість з тих елементів геологічної будови та будови земної поверхні з високим ступенем достовірності можуть виділятися на матеріалах космічної та аерофотозйомок. Крім того, проведення детальних дистанційних досліджень дозволяє не тільки виявити місця можливого скупчення вуглеводнів, але й простежити динаміку їхнього розвитку, принаймні з часу формування сучасного рельєфу. Класичними стали приклади співвідношення нафтогазоносних структур з долинами річок, з перетинами різнонаправлених лінеаментів, ареалами еолових, карстових та інших форм рельєфу, зонами площинної ерозії грунтів. На нашу думку, настав час для теоретичного перегляду величезного фактичного матеріалу, який був накопичений за довгу історію дистанційних методів і розробки нових теоретичних моделей взаємодії нафтогазоносних структур з ландшафтоутворюючими процесами. Це б дозволило значно розширити можливості практичного використання дистанційних методів.

1. Siever R. Earth. — Harvard University, 1980.
2. Пазинич В. Г. Умови саморозвитку геосистем осадової товщі та їх роль у формуванні покладів вуглеводнів // Актуальні проблеми геології України: Матер. конф., 2000.
3. Пазинич В. Г. Функціональні зв'язки геосистем, основані на явищі капілярного підйому, та їх роль у переміщенні мінеральних мас у ландшафтній сфері // Вісник Київ. ун-ту. Сер. Географія.—1999.—№ 45.

Особенности применения материалов дистанционных аэрокосмических съемок при поисках азотных кремнистых терм

В. Н. Крат, Л. Д. Вульфсон, В. А. Гунченко, В. С. Оголенко, А. И. Кудряшов, В. Г. Авраменко

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Азотные кремнистые термы широко распространены в пределах Альпийского Средиземноморского пояса [1], крупнейшего подвижного пояса Земли. Этот пояс протягивается от Испании до Индонезии и включает Пиренеи, Альпы, Балканы, Карпаты, Крым, Кавказ, Копетдаг, Тянь-Шань, Памир, Гималаи, Тибет [2].

В состав альпийского пояса включены киммериды и герцениды, переработанные и активизированные в альпийскую эру и вошедшие в состав альпийских горных систем.

В пределах Памира альпийский тектогенез захватил южную часть территории и проявился в образовании складчатости и оживлении интрузивной деятельности в палеогене. В неоген-четвертичное время весь Памир вследствие горизонтального сжатия испытал исключительный по тектонической активности орогенез.

Орогенез многими исследователями объясняется столкновением Индостанской и Евроазиатской плит. Это представление подтверждается многими факторами и частными прямыми измерениями сближения Памира и Тянь-Шаня на Гармском полигоне. Существует и другая точка зрения [3], согласно которой воздымание горных вершин Средней Азии обязано подъему аномально разогретого мантийного вещества и растекания вещества астенолита в основании литосферных плит. Попытка объединить обе модели формирования орогена предпринята В. К. Кучаем [4]. Автор допускает, что по глубинным каналам из мантии происходит всплывание легких разогретых продуктов химико-плотностной дифференциации вещества вплоть до литосферы и земной коры. Эти массы, накапливаясь, создают астенолинзы, растекание которых обеспечивает горизонтальное перемещение плит. А. Л. Яншин и др. [5] также считают, что «сближение плит провоцировало не только их крупномасштабную деформацию, но и разогрев, который, в свою очередь, способствовал протеканию этой деформации».

В развитии Среднеазиатского орогена выделяется два этапа. В первый этап, когда преобладают силы растяжения, происходит прогрессивное увеличение тектонических депрессий. На втором этапе преобладают силы сжатия и интенсивно увеличивается высота и площадь поднятий. Первый этап Среднеазиатского орогена длился с конца нижнего мела до олигоцена. Второй этап — с неогена по настоящее время.

© В. Н. КРАТ, Л. Д. ВУЛЬФСОН, В. А. ГУНЧЕНКО, В. С. ОГОЛЕНКО, А. И. КУДРЯШОВ, В. Г. АВРАМЕНКО, 2002

На первом этапе в связи с силами растяжения произошел раскол земной коры, подъем мантийного вещества, ультраосновной вулканизм и образование океанической коры (реликтами этого рифтогенного прогиба являются офиолиты зоны Инд-Цангпо и др.). С расширением Тетиса и океанической коры зона разуплотненной мантии расширялась, затрагивая континентальные склоны. В пределах Таджикского сегмента зона разуплотненной мантии, вероятно, соответствовала границам прогиба Тетиса. Область распространения разуплотненной мантии характеризовалась повышенной плотностью теплового потока и интенсивным проявлением газово-жидких флюидов (связанных с дегазацией мантии), что привело к прогреву земной коры и приведению в относительно пластичное состояние. На втором этапе, когда преобладали силы сжатия, активным был надвиг Индостанской плиты. На начальном периоде этапа между неразупрочненной прогреванием Индостанской плитой и южным ограничением Евроазиатской плиты располагался участок литосферы с существенно пониженными мощностью и вязкостью. Ее прочностные свойства были настолько низки, что напряжения горизонтального сжатия не могли передаваться на значительные расстояния. Поэтому интенсивному смятию и деформациям подверглись участки, непосредственно прилегающие к неразупрочненной Индостанской плите. По мере скучивания и утолщения литосферы сжимающие напряжения и деформации охватывали более северные участки. Этот процесс длился до тех пор, пока скучиванием не была охвачена вся прогретая литосфера над разуплотненной мантией. После этого начинают реализоваться подвижки по зонам разрывных нарушений, т.е. на смену складчатым деформациям приходят глыбовые перемещения, характерные для последнего орогенного этапа развития Таджикского сегмента Альпийского Средиземноморского пояса.

В результате орогенеза образовались горные сооружения Средней Азии с максимальными абсолютными отметками на Памире более 6000 м.

Азотные кремнистые термы широко распространены в пределах Южного Памира. Здесь известно восемь проявлений (источников) с температурой от 31.5 °С (источник Сасыкбулак) до 76.0 °С (источник Каук). Шесть выходов термальных вод приурочены к тектоническим нарушениям в гранитах аличурского ($\gamma\ \delta\ K_1\ a_2$) и памиро-шугнанского ($\gamma\ K_1\ p$) типов. При этом источники с более высокой температурой (62.0—76.0 °С) связаны с гранитами аличурского типа, а теплые (31.5—39.0 °С) — с гранитами памиро-шугнанского типа. Один выход азотных кремнистых терм (источник Элису) приурочен к контакту палеогеновой интрузии диоритов

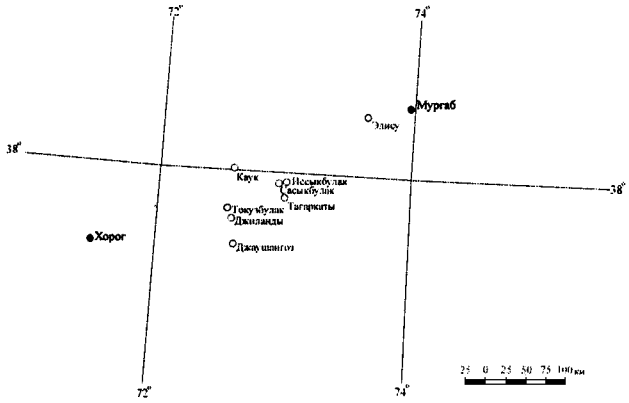


Рис. 1. Схема расположения азотных кремнистых терм Памира

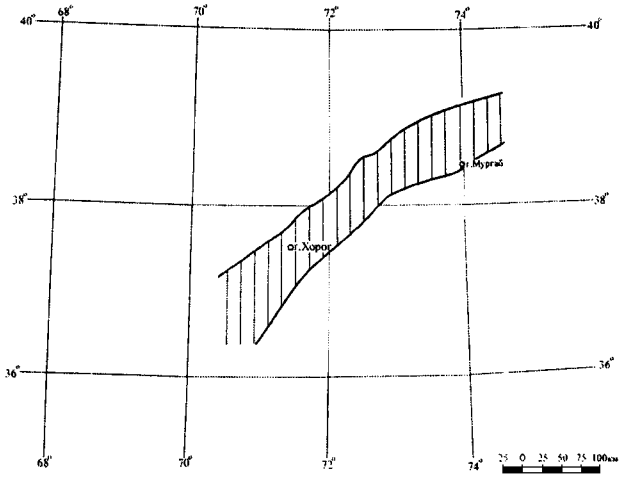


Рис. 2. Расположение зоны пониженной скорости в мантии

с песчано-сланцевой толщей пермской системы. Восьмой выход азотных кремнистых терм (источник Джаушангоз) расположен на периферийной части докембрийского срединного массива, осложненного интрузиями кислого состава (рис. 1).

Все азотные кремнистые термы Южного Памира связаны с трещинно-жильными водонапорными системами [6] и приурочены к разломам в интрузивных породах преимущественно кислого состава. Площадь распространения минеральных источников совпадает с зоной разуплотненной мантии (или повышенных температур), образовавшейся на месте существовавшей в мезозое рифтовой структуры и выявленной на глубине 120—300 км по данным регистрации проходящих волн от Памиро-Гиндукушских глубокофокусных землетрясений [7]. Эта зона характеризуется пониженной пластовой скоростью распространения волн ($V_{пл}$ = 7.1 км/с) и протягивается в пределах Северного Афганистана и

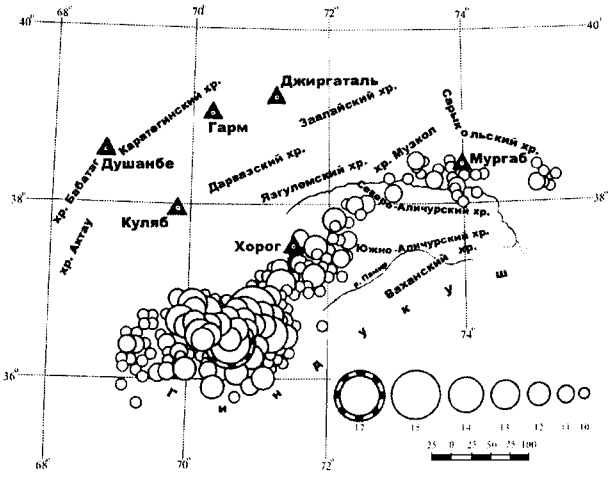


Рис. 3. Эпицентры мантийных Памиро-Гиндукушских землетрясений с $k \geq 10$ [8]

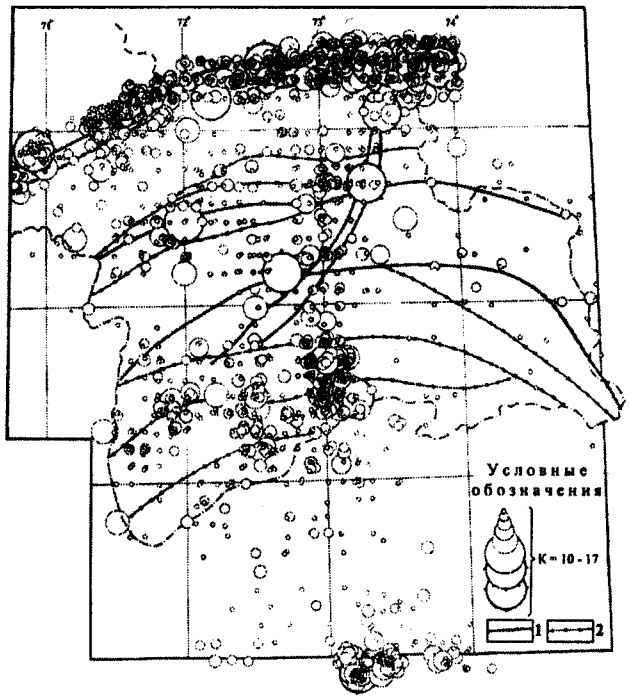


Рис. 4. Эпицентры коровых землетрясений Памира $k = 10—17$: *1* — краевые тектонические разломы, *2* — региональные тектонические разломы

Юго-Западного Памира полосой шириной от 50 до 80 км (рис. 2).

С зоной разуплотненной мантии связаны активные проявления глубокофокусных землетрясений. В среднем за год в этой зоне происходит 1000—1500 землетрясений с $k \geq 9$ [8]. Землетрясение отмечается по всей глубине зоны, но самые сильные обычно происходят в ее нижней части. Плотность эпицентров землетрясений по площади неравномерна, наибольшее их количество концентрируется на северо-западе Гиндукуша и в юго-западной части Памира (рис. 3).

Коровые землетрясения контролируются зонами краевых и региональных разломов, проявляются на всей территории Памира и не увязываются с площадью распространения азотных кремнистых терм (рис. 4).

Таким образом, наличие разуплотненной мантии, активное сближение Памира и Тянь-Шаня, а также высокая сейсмичность определяет характер деформаций литосферы Памирского блока.

Теоретическими расчетами и экспериментальными данными о напряженном состоянии пород при деформации по механизму сдвигания установлено, что область развития оперяющих разрывов зависит от механических свойств пород и располагается симметрично под углом меньше 45° к оси главных нормальных напряжений [9].

Оценка современных перемещений блоков и деформаций литосферы Памира по результатам исследований механизма очагов землетрясений проведена О. А. Кучай [10]. Средний азимут направления горизонтального движения Памира при правосдвиговых смещениях составляет 320±11°, а скорость сближения Памира и Тянь-Шаня — 0.175—0.35 см/год. В условиях горизонтального сжатия Памирский блок испытывает общее выдавливание вверх со скоростью 0.1—0.3 мм/год, а из-за пониженной прочности зон глубинных региональных разломов — правосдвиговые смещения со скоростью 0.1—1.55 см/год [4]. Деформации в зонах глубинных региональных разломов Памирского блока происходит как в виде вязкого течения, так и в виде оперяющих разрывных нарушений. Азимуты оперяющих разрывных нарушений совпадают с секторами преимущественного горизонтального растяжения, определенных по изучению механизмов землетрясений [8], и составляют 100±15° и 280±15°.

Разрывные нарушения, оперяющие глубинные разломы, служат подводными каналами для поступлений термоминеральных вод. Так, по данным В. К. Кучая [4] тектонически активный Махалинский разлом, оперяющий региональный глубинный Вахшский разлом, служил подводящим каналом для термоминеральных вод. В местах выхода этих вод на дневную поверхность происходило отложение травертинов значительной мощности. Активная разгрузка термоминеральных вод происходила в среднем плейстоцене и прекратилась в среднем голоцене.

Изучение термальных вод Памира также показало, что их разгрузка приурочена к активным разрывным нарушениям, оперяющим глубинные разломы. Особенно отчетливо это картируется по выходам углекислых термальных вод, отлагающих травертины [11]. Так, источник Гарм-Чашма приурочен к активному тектоническому нарушению, оперяющему Гарм-Чашминский разлом. Места разгрузки термальных вод, картируемые по отложениям травертина, переместились в западном направлении на 700 м, и проявляются в виде фонтанирующих грифонов в нижней части травертинового конуса (рис. 5).

Травертины и нижезалегающие коренные породы (гнейсы) разбиты разломом, который расширяется в восточном направлении до 15 см на удалении 10 м от фонтанирующих грифонов (рис. 7).

Скорость образования разломной зоны, определенная по травертинообразованию, составляет около 2 см/год, а скорость расширения разлома около 3 мм/год. Азимут простирания разлома 270°.

Водовыводящие разломы азотных кремнистых терм изучались при геологоразведочных работах на термальные воды. Так, на месторождении азотных кремнистых терм Джиланды, разгрузка термальных вод происходит по тектоническому нарушению, оперяющему Токузбулакский глубинный разлом [6]. Азимут простирания оперяющей разломной зоны — 265°. Ширина оперяющей разломной зоны 300 м, длина 900 м (рис. 6).

Приведенные данные показывают, что наблюдаемая в природных условиях ориентировка оперяющих разрывов (около 45°) по отношению к азимуту направления горизонтального движения и вектору смещения Памирского блока совпадает с теоретической и расчетной по сейсмическим данным схемой вторичного разрывообразования для областей сжатия со сдвиговыми смещениями.

Таким образом, для тектонически подвижных зон, находящихся в условиях тектонического сжатия с правосдвиговыми смещениями, выходы азотных кремнистых терм приурочены к активным современным тектоническим нарушениям, оперяющим глубинные тектонические разломы.

Формирование азотных кремнистых терм увязывается с дегазацией разуплотненной мантии и подъемом газообразных компонентов по активным тектоническим разломам. Газово-жидкие флюиды при подъеме к поверхности земли вследствие минералообразования обедняются рудными и другими компонентами. Конечным продуктом газово-жидких флюидов, восходящих в зоне распространения магматических пород, являются азотные кремнистые термы, а в метаморфических и осадочных породах — углекислые воды [11].

Особенности распространения и формирования азотных кремнистых терм определяют специфику применения аэрокосмических методов при поисково-разведочных работах, заключающуюся в картировании глубинных региональных разломов и поисках активных оперяющих разломных зон, выводящих термальные воды.

Изучение тектонического строения, и в частности картирование глубинных региональных разломов в областях новейшего орогенеза, производится на основании дешифрирования мелкомасштабных космических снимков. Для картирования глубинных региональных разломов Южного Памира был использован космический снимок, сделанный МСУ-С 9 июля 1984 г. в 6 ч 40 мин (рис. 8). На космическом снимке продольные линеаменты, соответствующие глубинным региональным разломам, как правило, представлены либо уступами, либо резкими ландшафтными границами, а также более или менее протяженными долинообразными понижениями. В наиболее простом случае линеаменты состоят из коротких прямолинейных участков речных долин, явно приуроченных к единой линии и вытянутых вдоль нее. Такие линеаменты особенно многочисленны в пределах высокогорной сильно расчлененной территории Западного Памира. В большинстве случаев такие линеаменты отвечают глубинным разломам, активным на новейшем этапе развития территории. Преобладающая часть выходов азотных кремнистых терм контролируется линеаментами, соответствующими Гунт-Аличурскому, Токузбулакскому, Гарм-Чашминскому, Истыкскому и Южно-Памирскому глубинным разломам (рис. 8). Данные региональные тектонические нарушения пересекают области с различным геологическим строением и контролируют выходы как азотных кремнистых терм, так и углекислых термальных вод.

Наряду с продольными линеаментами на космическом снимке отчетливо картируются кольцевые структуры, имеющие тектоническое происхождение. Вероятно, кольцевые структуры связаны с прогибами поверхности Земли на Памире и Гиндукуше над участками распространения разуплотненной мантии [4]. Пересечение кольцевых структур с продольными линеаментами, как правило, совпадают с оперяющими разломами, выводящими термальные воды, что картируется по выходам термальных источников (рис. 8).

Для картирования на космических снимках оперяющих разрывных нарушений, являющихся водовыводящими каналами для термальных вод, использовались крупномасштабные аэрокосмические снимки и тепловая съемка.

Крупомасштабные космические снимки для региональных трещиноватых зон Памира дешифрировались А. Алиевым [13]. Им выделено шесть основ-

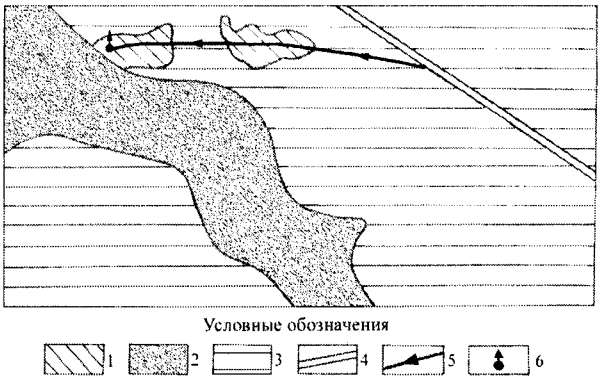


Рис. 5. Геологическая карта участка Гарм-Чашма: *1* — травертины, *2* — современные аллювиальные и пролювиальные отложения, *3* — метаморфический комплекс докембрия (Гарм-Чашминская свита), *4* — Гарм-Чашминский разлом, *5* — современное активное тектоническое нарушение, *6* — минеральный источник Гарм-Чашма

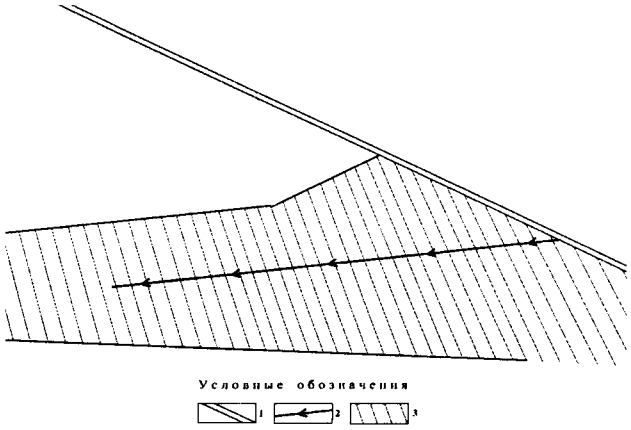


Рис. 6. Тектонического строения месторождения азотных кремнистых терм Джиланды: *1* — Токузбулакский глубинный разлом, *2* — оперяющий разлом, *3* — площадь трещинно-жильной водонапорной зоны на отметке 3400 м

Рис. 7. Современный активный разлом в травертинах источника Гарм-Чашма

Рис. 8. Дешифрированный космический снимок Южного Памира, сделанный с КА «Ресурс» (МСУ-С, 9 июля 1984 г., 6 ч 40 мин): *1* — продольные линеаменты, *2* — кольцевые структуры, *3* — термальные углекислые источники, *4* — азотные кремнистые термы

ных систем трещиноватости, отображающих дизъюнктивные дислокации конкретных направлений. Преобладающими среди выделенных направлений являются меридиональные. Системы трещин широтного простирания распространены меньше, однако с такими системами трещин совпадают большинство крупных оруденений. В целом линеаменты, дешифрируемые на крупномасштабных космических снимках, отражают планетарную трещиноватость земной коры. Такие линеаменты сравнительно небольшие по протяженности, многочисленные и образуют закономерно ориентированную сеть. Многие из таких линеаментов совпадают с линиями разрывов и зон трещиноватости. Применение крупномасштабных космических снимков для картирования оперяющих разломов не дает однозначных результатов, требует заверки на местности и поэтому малоэффективно.

Для дистанционного картирования оперяющих разломов, являющихся водовыводящими каналами

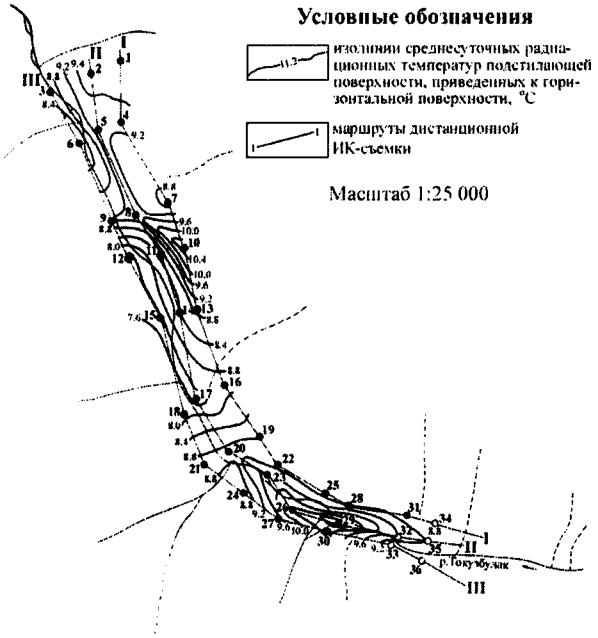


Рис. 9. Карта распределения среднесуточных радиационных температур подстилающей поверхности, приведенных к горизонтальной поверхности участка Джиланды

для термальных вод, наиболее перспективной является ИК-съемка [14]. Такая съемка проводилась в зоне Токузбулакского регионального разлома. Для дистанционного зондирования применялся комплекс оборудования, разработанный в Центре аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины [14, 15]. Он включает трассовый ИК-радиометр и телевизионную съемочную аппаратуру видимого диапазона (рис. 9).

Дистанционная съемка в долине р. Токузбулак проводилась с 20.09.79 по 22.09.79 г. восемь раз в сутки с вертолета и носила режимный характер. Маршруты съемки были проложены вдоль зоны Токузбулакского разлома по трем параллельным профилям. Расстояние между профилями изменялось от 150 до 600 м в зависимости от рельефа. Высота съемки 30 м, разрешение радиометра 5 м.

Результаты дистанционных ИК-съемок представлены в виде карты распределения среднесуточных приведенных к горизонтальной поверхности температур. На карте в восточной части Токузбулакского разлома (на южном блоке) отчетливо выделяется тепловая аномалия, связанная с разгрузкой термальных вод по оперяющему разлому.

В зоне оперяющего разлома Южной гидрогеологической экспедицией Управления геологии Таджикистана была проведена детальная разведка термальных вод месторождения Джиланды. Подсчитанные эксплуатационные запасы теплоэнергетических вод месторождения по категории «В» составляют 4853 $м^3$/сут при средневзвешенной температуре 76.6 °С. Годовое производство тепла при эксплуатации месторождения азотных кремнистых терм Джиланды составляет 30940 Гкал/год.

1. Басков Е. А., Суриков С. Н. Гидротермы Земли. — Л.: Недра, 1989.—245 с.
2. Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. — М.: Недра, 1984.—344 с.
3. Артюшков Е. В. Геодинамика. — М.: Наука, 1979.—328 с.
4. Кучай В. К. Современная динамика Земли и орогенез Памиро-Тянь-Шаня. — М.: Наука, 1983.—208 с.
5. Яншин А. Л. и др. Основные проблемы тектоники Азии. Тектоника Азии. 27 МГК. — М.: Наука, 1984.—Т. 5.—С. 3—10.
6. Крат В. Н. Минеральные лечебные, термальные и промышленные воды Таджикистана. — Душанбе: Дониш, 1985.—143 с.
7. Гольдвирт Э. А., Пак В. А., Таль-Вирский Б. Б. Результаты регистрации проходящих волн от Памиро-Гиндукушских глубокофокусных землетрясений // Памир-Гималаи. Глубинное строение земной коры. — М.: Наука, 1982.—С. 64—70.
8. Землетрясения Средней Азии и Казахстана (Каталог за 1983 г.). — Душанбе: Дониш, 1988.
9. Сафонов Ю. Г., Парфенов В. Д. Применение космических снимков в исследовании структур рудных полей и месторождений // Космическая информация в геологии. — М.: Наука, 1983.—С. 372—382.
10. Кучай О. А. Механизм очагов землетрясений и некоторые особенности тектонических движений земной коры Памира и южной части Таджикской депрессии // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. — М.: Наука, 1978.—С. 159—180.
11. Добровольский Е. В., Дорофей Е. Н., Воронин Е. В. и др. Исследование механизма и кинетики травертинообразования из углекислых источников // Геол. журн.—1987.—**47**, № 3.—С. 56—61.
12. Крат В. Н. Формирование минеральных вод Памира // Тез. 27 Междунар. геологического конгресса. — М., 1984.—Т. 9, ч. 2.—С. 353—354.
13. Алиев А. Региональная трещиноватость Памира и ее металлогеническое значение // Докл. АН СССР.—1980.—**250**, № 4.—С. 916—919.
14. Лялько В. И., Митник М. М., Вульфсон Л. Д. О возможности применения дистанционной ИК-съемки для выявления глубинных разломов // Геол. журн.—1988.—№ 3.—С. 71—75.
15. Лялько В. И., Митник М. М., Вульфсон Л. Д. Использование дистанционной тепловой и спектрометрической съемок для поисков нефтегазовых залежей и термальных вод. — Киев, 1981.—46 с.—(Препринт / АН УССР. ИГН; № 81-21).

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 149—166

Комплексирование аэрокосмических и геофизических методов при прогнозе нефтегазоносности северо-западного шельфа Чорного моря

А. И. Воробьев[1], Ю. В. Костюченко[1], В. И. Лялько[1], В. М. Перерва[1], С. Г. Семенова[2]

[1]Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

[2]Украинский государственный геолого-разведочний институт Министерства экологии и природных ресурсов Украины, Киев

С Азовским морем и северо-западным шельфом Черного моря связываются перспективы наращивания объемов нефтегазодобычи в Украине. Нефтегазовый потенциал этих регионов оценивается достаточно высоко. Однако промышленное освоение нефтегазовых месторождений здесь связано с рядом проблем, главными из которых являются технические (возможность бурения поисково-разведочных и эксплуатационных скважин при глубинах моря более 100 м) и методические (определение наиболее эффективной методики поисково-разведочных работ). Сложность решения первой из указанных проблем заключается лишь в ее финансовом обеспечении, так как в настоящее время существуют технические средства бурения на континентальном склоне и абиссали (глубины моря до 2000 м и более). Вторая проблема более сложная, так как она требует разработки и внедрения новейших технологий на основе решения сложных научных задач. Одним из наиболее эффективных подходов в решении этой проблемы представляется комплексирование методов, основанных на новейших технологиях.

Как показывают результаты более чем 15-летних исследований по прогнозу нефтегазоносности на шельфе, аэрокосмические методы являются довольно информативными. Наибольшей сложностью в их внедрении является преодоление своеобразного психологического барьера в оценке информативности этих методов со стороны специалистов-практиков. Выполненные к настоящему времени аэрокосмогеологические исследования на акваториях Азовского моря и северо-западного шельфа Черного моря [6—9, 13—20] свидетельствуют о том, что при изучении разрывных нарушений и геофлюидодинамических структур (ГФДС), новейшей геодинамики, и в особенности при оценке продуктивности нефтегазопоисковых объектов, эти методы даже более эффективны, чем геофизические методы, за счет одновременного площадного анализа изучаемых параметров на довольно большой территории региона. Прогнозируемые по аэрокосмическим данным объекты, находящиеся в гидродинамической связи с ГФДС, являются, как правило, продуктивными. Установлено, что среди выделяемых по данным тепловой космической съемки аномалий только те, которые имеют гидродинамическую связь с ГФДС, соответствуют промышленным скоплениям углеводородов. Методика изучения ГФДС на шельфе по данным космической съемки отработана к настоящему времени на уровне ее использования в производственном режиме, хотя ряд морфогенетических признаков ГФДС все еще остаются неизученными или слабоизученными.

При геолого-разведочных работах на нефть и газ в настоящее время используется комплекс сейсморазведки, бурения и промысловой геофизики. Однако коэффициент успеха данного комплекса в большинстве нефтегазоносных регионов обычно не превышает 33 %. Поэтому необходимо расширить комплекс исследований при геологоразведочных работах на нефть и газ на новом техническом и методическом уровне. Представляется, что включение в существующий комплекс работ аэрокосмических, гидроакустических и сеймоакустических методов позволит повысить достоверность прогноза нефтегазоносности. Основанием для таких рекомендаций могут служить результаты исследований, выполненных в пределах северо-западного шельфа Черного моря [4, 6—10, 13, 16—20]. По данным

© А. И. ВОРОБЬЕВ, Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, В. И. ЛЯЛЬКО, В. М. ПЕРЕРВА, С. Г. СЕМЕНОВА, 2002

тепловой съемки, выполненной с ИСЗ серии NOAA, доказана возможность применения данного метода для прогноза зон глубинных разломов, скоплений углеводородов, зон вертикальной миграции газообразных УВ, а также хорошее соответствие результатов дистанционных исследований с данными о размещении залежей УВ в данном регионе [4, 24].

Космические методы геологических исследований по сравнению с наземными методами имеют целый ряд преимуществ, среди которых наиболее важное значение имеет их относительная дешевизна на единицу площади и оперативность измерений, что позволяет осуществлять мониторинг, т. е. через определенный интервал времени проводить наблюдения, их обработку и интерпретацию. Это предоставляет возможность учитывать динамику процессов, связанных с проявлением неотектоники и выделений газов, обусловленных залежами углеводородов, залегающими на больших глубинах, и флюидопроводящими системами, развитыми в пределах северо-западного шельфа Черного моря [3, 4, 23, 24]. Современный уровень дистанционных методов позволяет выявлять эти зоны в пределах северо-западного шельфа Черного моря и других акваторий.

ИЗУЧЕНИЕ ФЛЮИДОПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

П. Ф. Шпак и др. [24] выделяют шесть основных факторов, контролирующих нефтегазоносность в регионе. Нам представляется, что среди них тип геотектонического режима, мощности нефтегазогенерирующих осадочных комплексов, степень их катагенетических преобразований и распределение литофаций в наибольшей степени определяют общие запасы УВ и их распределение в разрезе. Установлено [4, 24], что нефтегазопроявления в пределах северо-западного шельфа размещены преимущественно вдоль зон разломов субширотного (восток-северо-восточного) простирания и локализуются на участках их пересечения с разломами северо-восточного и северо-западного направлений. То есть, зоны разломов являются поисковым признаком нефтегазоносности участка. Однако только этих предпосылок недостаточно. Для прогноза нефтегазоносности важное значение имеют также распределение покрышек в разрезе и по латерали, размещение сети не только глубинных разломов, но и связанных с ними более мелких разрывных нарушений. На этой основе может проводиться временной анализ процессов расформирования первичных залежей, миграции УВ и мест их новых скоплений. Поэтому важное значение имеет изучение флюидопроводящих свойств различных интервалов разреза и блоков земной коры, а также влияние на эти свойства глубинных разломов и разрывных нарушений разного порядка.

По данным космических изображений морского дна северо-западного шельфа выделена довольно плотная сеть линеаментов [16, 20]. Линеаменты (ЛМ), как правило, пересекают различные тектонические элементы. Тем не менее широтное простирание части из них (например, Центрального линеамента [16]) хорошо согласуется с субширотным простиранием системы разломов, выделяемых по данным сейморазведки (Придунайский, Голицынский, Сулинско-Тарханкутский, Губкинско-Донузлавский и Северо-Эвксинский). В. М. Перерва на основании анализа системы линеаментов в данном регионе пришел к выводу о существовании двух типов линеаментов [20]: первый из них обусловлен проявлением разрывных нарушений, а второй связан с зонами разуплотнения (с повышенной пористостью и трещиноватостью пород). По-видимому, последний тип ЛМ образуется за счет колебаний горизонтальных напряжений и соответствующих им деформаций пород (как правило, без вертикальных смещений), залегающих под дном моря. По обоим типам ЛМ может происходить вертикальная миграция газообразных флюидов.

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ

Модель формирования линеаментов детально рассмотрена в работах [16—20]. Ограничимся лишь основными элементами этой модели. Линеаменты являются эрозионным срезом (следом на земной поверхности) вертикальных (субвертикальных) зон напряженно-деформированного состояния литосферы (ВЗНДС), осложненных в ряде случаев проявлением разрывных нарушений, амплитуда которых не всегда позволяет фиксировать их геофизическими методами. Формирование этих зон связывается с воздействием на Землю космогенных и эндогенных физических полей. Самые важные свойства ВЗНДС уверенно прослеживаются по характерным признакам линеаментов (прямолинейность, большая протяженность, отсутствие связи с ландшафтами и геотектоническими зонами, выдержанность плотности линеаментов одного ранга, закономерный характер планетарного размещения, периодическая повторяемость смены азимутов их простирания, составляющая в среднем 45°. В узлах пересечения ВЗНДС формируются геофлюидодинамические структуры литосферы [20], обладающие аномальными флюидопроводимостью и значениями теплового и электростатического полей, упругих напряжений и др.), геохимических и биохимиче-

ских полей. С ГФДСЛ связываются процессы энергомассообмена между различными сферами Земли.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН РАЗЛОМОВ И ПОВЫШЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ КАК ЭЛЕМЕНТОВ ФЛЮИДОПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ

В настоящее время установлено, что разломы играют важную роль в формировании скоплений УВ. Это связано с тем, что широкое развитие разрывных нарушений приводит не только к образованию антиклинальных структур, которые являются ловушками УВ, но и к улучшению фильтрационно-емкостных свойств пород в зоне, прилегающей к ним, образованию зон новейшей трещиноватости, которые могут представлять собой пути вертикальной (и субвертикальной) миграции УВ, зависящей от двух основных факторов: возраста образования, времени последней активизации и плотности разрывных нарушений в той или иной части региона, а также качества регинальных флюидоупоров и их стратиграфической приуроченности. Эти положения находят свое подтверждение и в условиях северо-западного шельфа Черного моря. Здесь по данным сейсморазведки выделено большое число субширотных и субмеридиональных разломов, а также более мелких разрывных нарушений [4, 16, 24]. Как правило, чем моложе возраст проявления разрывных нарушений, тем выше стратиграфический этаж нефтегазоносности и больше его интервал. Так, в пределах Голицынской площади глубинный разлом прослеживается вверх до уровня средней части среднемайкопской свиты, а залежи газа открыты в интервале отложений от палеоцендата до среднемайкопского включительно [4]. Глины верхнемайкопской серии представляют собой региональную покрышку, которая предотвращает разрушение залегающих ниже ее залежей. Минимальная глубина залегания газовых залежей в пределах Голицынского месторождения составляет около 500 м.

При выделении и прослеживании подобных геологических объектов, находящихся в области глубинных разломов, сейсморазведка сталкивается с определенными трудностями, поскольку широко используемый при геолого-разведочных работах на нефть и газ метод общей глубинной точки предназначен для изучения субгоризон-тальных сред. Оценку же нефтегазопер-спективности каждого из блоков, ограниченного разломами, можно проводить на основе детального изучения его геологического развития и внутреннего строения, а также прогноза процессов миграции и мест накопления УВ. Эффективность сейсморазведки при решении этих задач определяется ее разрешающей способностью, которая зависит от диапазона регистрируемых в процессе полевых работ частот.

Предельная разрешающая способность сейсморазведки по вертикали составляет в среднем $\lambda/4$, где λ — длина упругой волны. При средней частоте спектра колебаний 40 Гц (период колебаний 25 мс) и скорости распространения волны в среде 4000 м/с, вертикальная разрешающая способность (ВРС) данного метода составит около 25 м. В верхней части осадочной толщи скорость распространения сейсмических волн будут меньше. Если принять ее равной 2000 м/с, то ВРС сейморазведки составит около 12.5 м. Разрешающую способность сейсморазведки по латерали называют еще горизонтальной разрешающей способностью (ГРС). Она равна радиусу зоны Френеля и может быть записана в виде

$$R_{\Phi} \approx \sqrt{0.5H\lambda}.$$

При глубине до отражающей границы H = 4000 м и длине волны λ = 100 м значение R_{Φ} равно 450 м. При этих параметрах неоднородности среды (например, разрывы пласта, линзы), имеющие размеры меньше чем 450 м, не выделяются по данным сейсморазведки. Эти данные о ВРС и ГРС должен знать геолог, который использует данные сейсморазведки. Для достижения более высокого разрешения необходимо использовать более широкий спектр частот, применять меньшие базы группирования сейсмоприемников и др. Имея приведенные выше ограничения в разрешающей способности, сейсморазведка все же позволяет решать задачи выделения и прослеживания глубинных разломов и связанных с ними более мелких разрывных нарушений, а также дает возможность определить по ним, каких интервалов разреза могла достигать миграция УВ, и на этой основе с использованием других данных определять стратиграфические интервалы разреза, благоприятные для нефтегазонакопления. Для прогноза вертикальной миграции УВ может быть использован описываемый ниже метод изучения следа диффузионного потока УВ по данным обработки данных сейсморазведки с помощью программ, реализующих алгоритм дифракционного преобразования и вычисление амплитуд отражений, соответствующих горизонтам, залегающим выше нефтегазоперспективных горизонтов.

ПРОГНОЗ ЗОН ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИИ СЛЕДА ДИФФУЗИОННОГО ПОТОКА УВ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Прямые поиски УВ и прогнозирование геологического разреза по данным сейсморазведки пока не

нашли широкого применения на практике из-за того, что для решения этих задач разрешающая способность современной сейморазведки недостаточна. Поэтому представляется перспективным прогноз нефтегазоносности на основе анализа процессов миграции газообразных УВ и физико-химических изменений пород под воздействием мигрирующих УВ. В процессе миграции УВ оказывают влияние на окислительно-восстановительный потенциал осадочных отложений разреза. В результате над месторождениями происходят эпигенетические изменения вышезалегающей толщи пород. Область физических и химических изменений пород геологического разреза называют следом диффузионно-эффузионного потока (СДЭП) [22]. Восстановительная часть СДЭП характеризуется повышенной дифференциацией акустической жесткости слоев (за счет кальцитизации, ангидритизации, пиритизации и других процессов эпигенети-ческих изменений пород), что приводит к увеличению амплитуд отраженных волн, соответствующих этому интервалу разреза. Мощность восстановительной области СДЭП над нефтяными залежами могут достигать 200—300 м, а над месторождениями газа — 500—600 м. Современные методики цифровой обработки данных сейсморазведки позволяют обнаруживать аномалии амплитуд отраженных волн за счет СДЭП [22] и по ним осуществлять прогноз газовых залежей. При малой мощности залежей УВ их невозможно обнаружить с помощью сейсморазведки, но эпигенетически измененные отложения продуктивного разреза, объем которых намного превышает мощность продуктивного горизонта, отображаются в сейсмическом поле всегда. По мощности восстановительной области СДЭП и соответствующей ей области повышенных значений амплитуд отраженных волн на временном разрезе можно прогнозировать тип УВ — нефть, газ, конденсат. Область СДЭП над залежами УВ состоит из восстановительной зоны непосредственно над залежью, которая в сейсмическом поле выражается областью повышенных значений амплитуд ОВ (вследствие выпадения из растворов пластовых вод нерастворимых в восстановительной среде эпигенетических акустически жестких карбонатов, сульфатов, сульфидов и др.). Выше по разрезу образуется окислительная зона области СДЭП, которая в сейсмическом поле выражается уменьшением амплитуд ОВ вплоть до нуля, вследствие противоположного изменения в кислой среде акустической жесткости пластов, соответствующих отражающим горизонтам — уменьшения этого параметра у акустически жестких химически активных хемогенов, а также хорошо проницаемых жестких песчаников и увеличения — у акустически < мягких > мало-проницаемых глинистых пород, в порах которых задерживаются продукты растворения хемогенов, песчаников.

Прогнозирование залежей УВ с помощью данного метода выполнено на одной из площадей северо-западного шельфа Черного моря, расположенной севернее Голицынского газоконденсатного месторождения. Площадь исследования расположена в зоне сочленения юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы со Скифской плитой, где проходит Голицынский разлом, четко выраженный в структуре осадочного чехла. В пределах разлома находится Голицынская структура с газоконденсатными залежами в дат-палеоценовых известняках и майкопских алевролито-песчаных отложениях. Сейсми-ческий материал проанализирован по субмеридиональным профилям, на временных разрезах которых наблюдается большое количество почти равномерно распределенных отражений, вдоль которых исследовано распределение амплитуд ОВ. По значениям отклонений средних значений амплитуд ОВ на заданной базе профиля от среднего значения амплитуды, измеренной для всего отражающего горизонта профиля, построены поля относительных изменений амплитуд отражений. На этих полях, рассчитанных для профилей, пересекающих различные геологические структуры: моноклинальную зону погружения юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы, Голицынскую антиклинальную структуру с газовой, а также газоконденсатной залежами и южное погружение слоев в направлении Черноморской впадины, как по латерали, так и по глубине, наблюдаются дифференцированные, неравномерно распределенные аномалии амплитуд отражений. Распределение амплитуд ОВ вдоль профилей и по глубине для названных частей территории исследования значительно различается, что видно на примере одного из обработанных профилей (рис. 1).

В области погружения слоев южнее Голицынского месторождения распределение относительных значений амплитуд наблюдается главным образом вдоль слоистости, и лишь в нижней части разреза прогнозируется небольшая залежь нефти: локальный минимум поля $\Delta A/A$, ограниченный по бокам и сверху локальными максимумами амплитуд (площади ВНК, покрышка и восстановительная зона области СДЭП). Выше максимума наблюдается область пониженных значений $\Delta A/A$, которая может соответствовать окислительной зоне области СДЭП прогнозируемой залежи нефти. На площади Голицынского месторождения минимум амплитуд ОВ в пределах продуктивных дат-палеоценовых отложений перекрывается интенсивным максимумом поля $\Delta A/A$ = 150—200 % — до самого верхнего отражения, что соответствует восстановительной области СДЭП. Лишь на уровне майкопских продуктивных

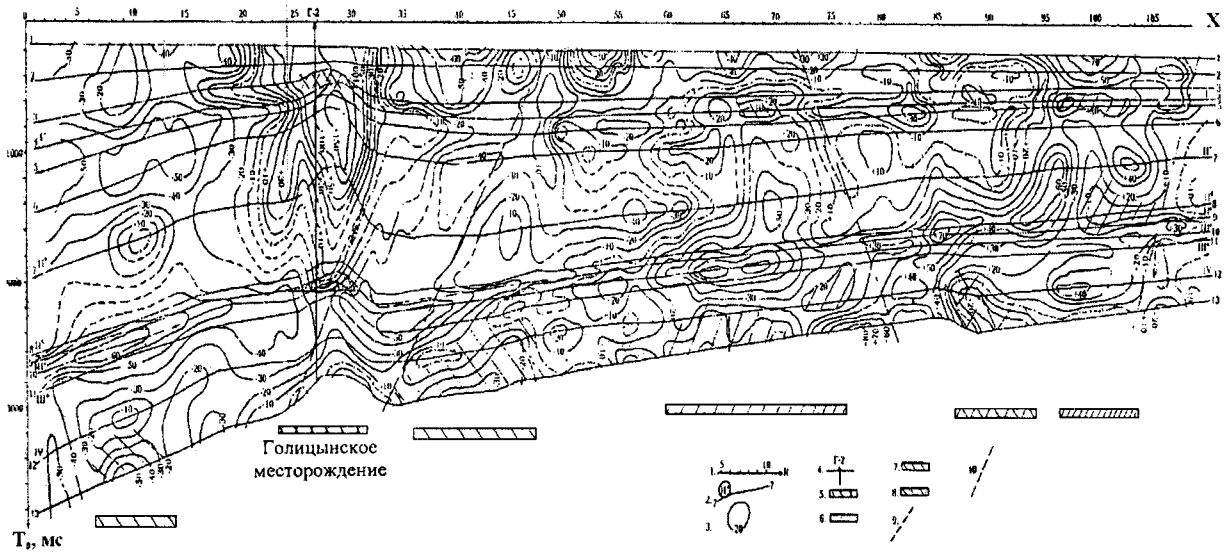


Рис. 1. Поле относительных изменений амплитуд отраженных волн по профилю 10. *1* — пикеты; *2* — отражающие горизонты; *3* — изолинии $\Delta A/A$, %; *4* — скважина Голицынская-2; *5* — Голицынское газоконденсатное месторождение. Прогнозируемые залежи: *6* — газа; *7* — нефти; *8* — конденсата. Разрывные нарушения: *9* — Голицынский глубинный разлом; *10* — прогнозируемые тектонические нарушения

отложений этот максимум относительно понижается из-за частичного поглощения волн в залежи. При максимальном диффузионно-эффузионном потоке над Голицынскими залежами УВ окислительная зона не успевает образоваться, поэтому значительный максимум амплитуд ОВ наблюдается до самого верха осадочного чехла. Наблюдаемые минимумы поля $\Delta A/A$ на склонах Голицынской структуры, соответствующие продуктивному горизонту, за контуром залежи могут быть связаны с законтурными эпигенетически преобразованным отложениям в среде с повышенным окислительным потенциалом. На север от Голицынской залежи УВ в нижней части осадочного чехла по всем исследованным профилям наблюдается распределение амплитуд, характерное для залежи нефти: минимум амплитуд перекрывается узким максимумом (восстановительная область СДЭП над залежью нефти), выше которого наблюдается поле пониженных значений амплитуд (окислительная зона области СДЭП прогнозируемой залежи).

Севернее на площади исследования по всем профилям наблюдается аномальное распределение амплитуд по глубине, характерное для залежи газа в нижней части разреза: минимум амплитуд ОВ перекрывается интенсивным, резкоградиентным максимумом (покрышка прогнозируемой залежи), который выше перекрывается повышением амплитуд ОВ значительной величины, соответствующим восстановительной области СДЭП, сменяющимся выше уменьшением полем амплитуд, соответствующим окислительной области СДЭП. Локальные осложнения поля на уровне продуктивных майкопских отложений и на некоторых других участках разреза могут быть обусловлены повышенным скоплением УВ в разрезе над основной залежью. Далее на север по профилям исследования аномальное распределение амплитуд по глубине соответствует нефтегазовому скоплению в основании осадочного чехла и в майкопских отложениях.

Еще севернее по всем профилям прослеживаются аномальные зоны, характерные для залежей газа на уровнях дат-палеоценовых и майкопских отложений. Причем области СДЭП над этими прогнозируемыми залежами соответствует очень интенсивные положительные аномалии амплитуд вплоть до самого верхнего отражающего горизонта, как и над Голицынскими залежами УВ. Окислительной зоны области СДП — отрицательного поля амплитуд — здесь также не наблюдается, но в верхней части интенсивность положительного поля все же ослабевает вследствие возможного перехода восстановительной зоны области СДЭП в окислительную. Поля амплитуд отраженных волн вдоль профилей севернее Голицынского месторождения УВ в пределах спокойного моноклинального залегания отложений оказались очень дифференцированнми и аномальными. Аномальные области полей амплитуд выделяются как для нефте-газонасыщенных интервалов на уровне продуктивных на Голицынской площади дат-палеоценовых и майкопских отложений, так и в основании осадочного чехла.

Прогнозные залежи УВ, показанные на рис. 1, расположены на моноклинали параллельно положению Голицынского месторождения. Таким образом, использование описанного выше метода обработки и интерпретации данных сейсморазведки позволило не только выделить аномалии поля амплитуд отраженных волн, которые являются результатом процессов миграции УВ на Голицынском месторождении, но и прогнозировать новые скопления нефти и газа на этой площади.

На всех этапах прогноза зон миграции УВ проводится контроль получаемых результатов на основании изучения керна, извлекаемого в процессе бурения, и данных геофизических исследований скважин, особенно в пределах тех участков и зон, где пробурено достаточно много скважин.

ПРОГНОЗ ЗОН АНОМАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

На основе детального комплексного изучения интервальных скоростей распространения и поглощения сейсмических волн возможен прогноз зон повышенной трещиноватости и областей повышенных тектонических напряжений [1, 16]. В работе [1] обосновывается возможность и методические приемы повышения точности определения скоростей и на этой основе структурных построений по данным сейсморазведки. Поскольку интервальные скорости ($V_{инт}$) и поглощение характеризуют упругие свойства пород, зависящие от величин тектонических напряжений и трещиноватости, то распределения $V_{инт}$ для различных литолого-стратиграфических комплексов могут быть использованы для выявления различий по флюидопроводимости различных зон и интервалов геологического разреза, а также для прогноза зон повышенных тектонических напряжений, АВПД и направлений миграции УВ. Точность определений сейсмических скоростей для малых (до 0.5 км) и средних глубин (2—3 км) выше, чем по отражающим горизонтам, залегающим на глубинах более 3 км. Поэтому основное внимание необходимо уделять измерениям интервальных скоростей, соответствующих интервалам разреза, залегающим на малых и средних глубинах. Методика детального изучения скоростей по данным сейсморазведки разработана, а современный уровень вычислительной техники допускает ее реализацию. Для интерпретации данных изучения скоростей по данным сейсморазведки МОГТ с целью выявления аномальных зон тектонических напряжений необходимо сопоставление измеренных и расчетных (нормальных) значений интервальных скоростей. С этой целью используются нормальные зависимости $V_{инт}(H)$ для различных литологических разностей пород и стратиграфических интервалов разреза.

Эффективность исследований по прогнозу аномальных зон повышенных трещиноватости и напряжений по данным изучения скоростей и поглощения сейсмических волн будет зависеть от таких факторов, как разрешенность записи, детальность изучения этих параметров вдоль профилей и плотности профилей на площади, а также степень соответствия алгоритмов вычислений реальным моделям геологического разреза. Следует отметить, что морская сейсморазведка имеет определенные преимущества по сравнению с наземной при решении задачи прямых поисков зон повышенной флюидопроводимости (более стабильные условия возбуждения и приема сейсмического сигнала), что повышает вероятность выделения аномалий скоростей и поглощения, обусловленных повышенной трещиноватостью или разуплотнением пород. Одним из методов, который может повысить эффективность решения этой задачи, является изучение анизотропии сейсмических скоростей (на основе сопоставления измерений скоростей по различным направлениям).

Детализацию наиболее перспективных на нефть и газ участков в пределах зон, выделенных по данным дистанционных исследований и сейсморазведки, целесообразно проводить с помощью гидроакустического и сейсмоакустического методов, имеющих более высокую разрешающую способность при поисках зон повышенной флюидопроводимости и вертикальной миграции.

ПРОГНОЗ ЗОН ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ УВ ПО ДАННЫМ ГИДРОАКУСТИКИ

Выявление газовых выделений на дне моря и ореолов вторжения УВ проводится по данным гидроакустического профилирования. Анализ данных по газовым выделениям, обнаруженным в Черном море [3, 23] свидетельствует о том, последние прослежены как на шельфе при глубинах моря от 30—40 м до 100—140 м, так и на континентальном склоне (до глубин моря 400—500 м).

В данной работе использованы результаты исследований во время рейсов НИС «Киев», научным руководителем которых был академик НАН Украины Е. Ф. Шнюков [23], а также данные, приведенные в [14]. Нами выполнен анализ гидроакустических данных, полученных в северо-западной части Черного моря (в пределах экономической зоны Украины). В тектоническом отношении регион исс-

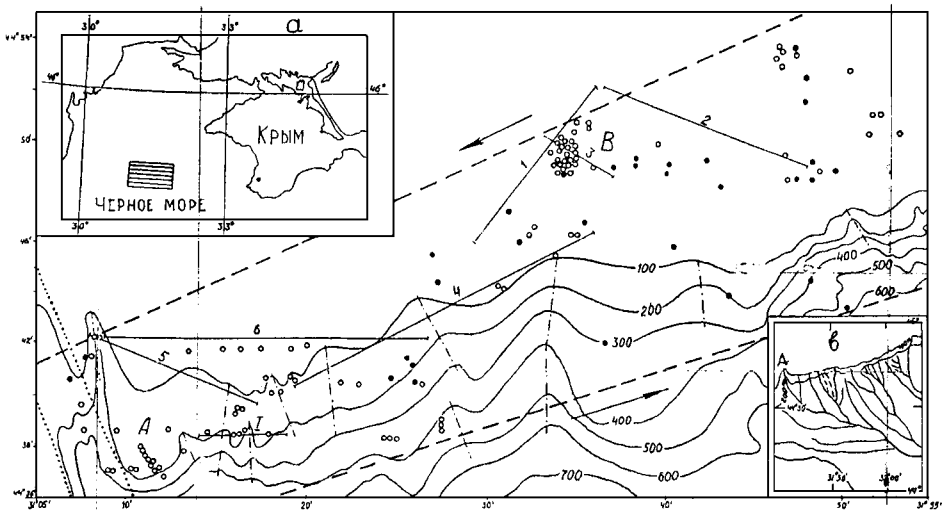


Рис. 2. Карта батиметрии и расположения мест газовых выделений на полигоне в пределах северо-западной части Черного моря. На вставке слева вверху штриховкой обозначен полигон, справа внизу — схема каньонов. Кружки — места ГВ по данным [14], точки — по [23], цифры — номера профилей

ледований входит в геодинамически активную зону с относительными сдвигами Мизийского микроконтинента (Западно-Черноморская впадина) относительно Скифской плиты (северо-западный шельф и Крым) [26]. На рис. 2 направления относительного движения этих плит показаны стрелками. Таким образом, область перехода от шельфа к континентальному склону на больших глубинах представляет зону относительного движения Скифской и Мизийской плит.

При проведении исследований связи нефтегазоносности с газовыми выделениями на морском дне и закономерностями их расположения в пределах северо-западного шельфа использовались данные гидроакустики (на частотах 36 кГц и 3.5 кГц) и сейсмоакустики (интервал частот 100—300 Гц), т. е. верхний предел частот превышал нижний примерно в 100 раз. Поэтому и разрешающая способность по вертикали, которая составляет около 1/4 длины волны, отличается также в 100 раз. При скорости распространения упругих колебаний 1500 м/с разрешающая способность гидроакустики при преобладающей частоте 3.5 кГц составляет около 0.1 м, сейсмоакустики — 2 м. В соответствии с разрешающей способностью, эти методы используются для решения различных геологических задач.

Данные гидроакустического профилирования, полученные во время рейсов НИС «Профессор Водяницкий» и «Киев», использовались с целью изучения рельефа морского дна [2] и поисков мест газовых выделений. Для анализа связи рельефа морского дна с газовыми выделениями рассмотрим рис. 2 и 3. На рис. 2 приведена батиметрическая карта, на которую вынесены места газовых выделений. В левом верхнем углу показано географическое положение исследуемого участка, а в правом нижнем углу схематически изображена сеть каньонов, установленная В. И. Мельником. При анализе данных оценивались плотность газовых выделений в пределах различных участков и их приуроченность к различным элементам рельефа. Газовые выделения (ГВ) первой группы приурочены к участкам изрезанного рельефа с глубинами моря от 100 до 300 м (участки 1, 2 и 3). Видно, что ГВ расположены на склонах складок, высота которых составляет около 100 м. В прогибах между складками наблюдаются блоки пород, которые сползли со склонов этих складок. Оползни приводят к открытию каналов для проникновения газов из более глубоких горизонтов. Большая часть ГВ сосредоточена в переходной зоне от шельфа к континентальному склону с глубинами моря от 100 до 500 м. Эта зона имеет субширотное простирание и ширину около 10—12 км. На глубинах шельфа менее 100 м ГВ обнаружены только в юго-восточной части участка. Этот факт можно объяснить тем, что в пределах шельфа пачки слоев, которые перекрывают газонасыщенные слои, меньше подвержены экзогенным процессам (размыв, оползни и др.). Нами установлено, что положение ГВ по данным исследований [14, 23], выполненных с интервалом 6 лет, не повторилось. Это свидетельствует о том, что в разное время исследований фиксируются активные фазы с газовыделением различных флюидопроводящих зон на морском дне. Создается впечатление о смещении ГВ по площади со временем. Это очень важный вывод для оценки природы и возможностей

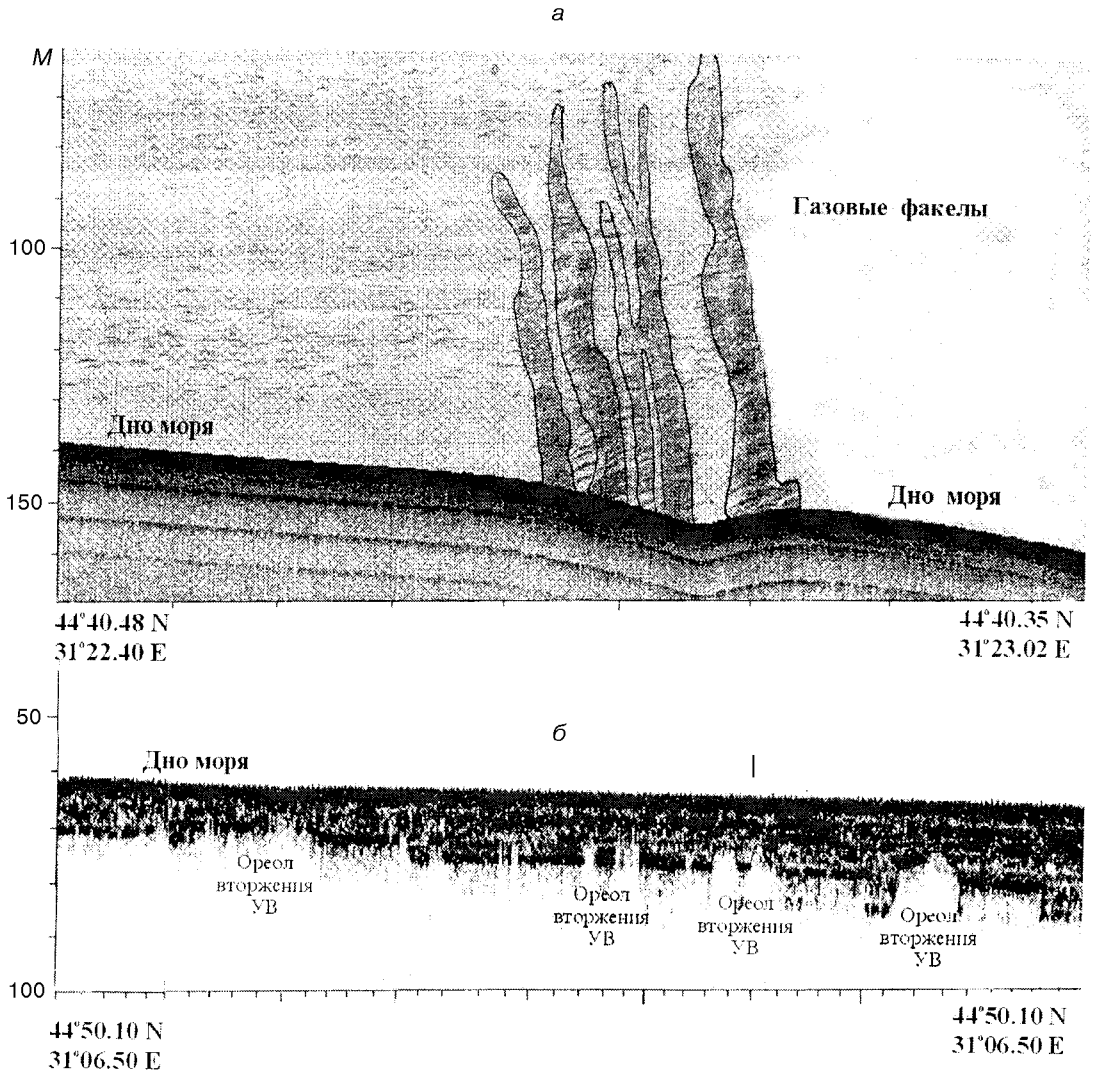


Рис. 3. Газовые «факелы» (а) и ореолы вторжения УВ (б) по профилям гидроакустического профилирования в пределах северо-западного шельфа Черного моря

промышленного использования ГВ. В пределах зоны А большая часть ГВ находится в западной ее части. Здесь прослеживается область линейного размещения ГВ с центром в точке 44°37′ с.ш. и 31°11.5′ в.д. Самая высокая плотность ГВ обнаружена на шельфе на глубинах моря 50—70 м (центр области расположен в точке с координатами 44°49.5′ с.ш. и 31°34.4′ в.д.).

Детальный анализ батиметрии позволяет говорить о наличии на данном участке Черного моря складчатости, подобной той, которая была открыта в восточной части Черного моря и других районах Земли, и, вероятно, связанной с зонами конвергентных границ плит. Из рис. 2 видно, что оси складок, которые показаны пунктирными линиями с точками, расположены кулисообразно относительно друг друга. Направления осей складок почти перпендикулярны к направлению усредненной изобаты 100 м. На участках перехода от шельфа к континентальному склону наблюдаются изломы осей этих складок. Максимальная ширина зоны складчатости от изобаты 100 м до изобаты 600 м составляет около 15 км. Размеры складок в крест простирания осей (половина длины волны) изменяются от 1—2 км в юго-западной зоне участка до 15—16 км в средней зоне участка.

Анализ положения ГВ относительно складчатости свидетельствует о том, что в пределах области перехода от шельфа к континентальному склону (область А), там где размеры складок меньше (юго-западная часть участка) плотность ГВ выше, а там, где размеры складок больше (юго-восточная

часть участка) плотность газовых выделений ниже. Амплитуды изменения рельефа морского дна здесь достигают 100 м, а иногда и более [2].

Складчатость на морском дне может также оказывать влияние на образование оползней (на склонах поднятий), что приводит к уменьшению толщины осадков (играющей роль покрышки), перекрывающих зоны накопления газов и в результате к прорыву газов вверх к морскому дну и выше его, т. е. к образованию так называемых «газовых факелов», которые фиксируются гидроакустикой (рис. 3, а).

Кроме того, процесс складкообразования при определенных значениях тектонических напряжений может вызывать развитие грязевого вулканизма и выжимание поровых вод и глинистых пород по разрывам.

В пределах тех участков шельфа, где слабы эрозионные процессы, и отсутствуют газовые выделения со дна моря, рекомендуется проводить поиски ореолов вторжения УВ по данным гидроакустики или сейсмоакустики (там, где глубинность гидроакустики недостаточна).

ПОИСКИ ОРЕОЛОВ ВТОРЖЕНИЯ ГАЗОВ НА ШЕЛЬФЕ КАК КРИТЕРИЕВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

Известно [3, 14], что залежи УВ и особенно газа создают в прилегающей к ней вышезалегающей области геологического пространства ореолы рассеяния, которые особенно значительны при переформировании залежей и проявляются в геологическом разрезе в виде изменений физических (скорость, плотность) и петрохимических свойств горных пород. Степень этих изменений, их геометрические размеры и возможность выхода газов на поверхность определяется типом миграции УВ (диффузия, струйная миграция, восходящий поток подземных вод), зависящего от объемов и давлений газа, поднимающегося ко дну моря, а также мощности и свойств прилегающей к нему пачки пород, то есть ее свойств в качестве покрышки. Зоны просачивания газа являются индикаторами наличия залежей УВ на глубине. Для их обнаружения можно использовать акустические методы исследований в более высокочастотном диапазоне рабочих частот по сравнению с традиционной сейсморазведкой по методу общей глубинной точки. Для того чтобы обеспечить глубинность изучения разреза до 200—400 м необходимо применение сейсмоакустического метода с рабочим диапазоном частот 200—700 Гц [14, 21]. Интересные результаты по выделению ореолов вторжения УВ получены по данным сейсмоакустики при инженерно-геологических исследованиях в пределах северо-восточного шельфа о. Сахалин [13]. В работе [3] приведены примеры ореолов вторжения УВ в пределах шельфа Болгарии по данным сейсмоакустики (частота максимума спектра упругих волн была равной 300 Гц). В пределах континентального склона при глубинах моря 220—325 м и углах наклона дна 2—2.5° открыты формы рельефа типа кратеров, диаметр которых составляет 50—210 м, глубина — 2.5—8 м, а наклон дна — до 14°.

В условиях шельфов Черного и Азовского морей имеются более благоприятные возможности для выделения ореолов вторжения УВ по сравнению с другими регионами Украины. В пределах северо-западного шельфа Черного моря нами выделены ореолы вторжения УВ, которые обычно выделяются на временных или глубинных разрезах сейсмоакустики и гидроакустики по нарушению непрерывности отражающих границ, наблюдаемых под дном моря. На рис. 3, б приведен фрагмент глубинного разреза, полученного по данным гидроакустики (на частоте 3.5 кГц), на котором четко выделяется аномальная область записи, соответствующая «ореолу вторжения газов», который почти достигает морского дна (глубина его кровли составляет около 2 м). Из разреза на рис. 3, б видно, что при глубине моря 130—140 м глубинность гидроакустического профилирования ниже морского дна составляет около 20—25 м. На участке исследований придонные слои, слагающие геологический разрез, имеют субгоризонтальное залегание. Выделяются четыре отражающих границы, мощности интервалов разреза между которыми изменяются от 3—3.5 м для верхних трех интервалов до 7 м у самого нижнего интервала. По оценкам А. А. Шрейдера и др. [25], полученным без учета уплотнения пород, в плиоцене нижний предел скорости осадконакопления (НПСО) в исследуемом районе Черного моря составлял около 22 см/тыс. лет. Используем эти данные для примерного расчета интервала времени образования нижнего интервала разреза, подошва которого соответствует самому нижнему отражению на рис. 3. Расчет времени осадконакопления данного интервала при скорости осадконакопления, равной НПСО, показывает, что формирование данного интервала началось примерно 75 тыс. лет назад. В это время в Европе [5] началась эпоха вюрмского оледенения (называемого валдайским на Русской равнине), продолжавшегося от 80 до 10 тыс. лет назад. Рассматриваемая отражающая граница, вероятно, соответствует скачку в изменении литологии пород от глинистых пород, которые отлагались при глубинах моря около 100—130 м, к песчанистым породам, которые начали отлагаться в определенный период регрессии, которая наступила в эпоху оледенения. Объем их осадконакопления постепенно возрастал по мере обмеления Черного

моря. Из рис. 3, б видно, что на глубинах 20—30 м под дном моря наблюдается большое число ореолов вторжения. Это свидетельствует об огромных объемах УВ, которые находятся под небольшой пачкой слоев, залегающих ниже дна моря. Для прослеживания «корней» этих ореолов вторжения на глубине необходимо использовать сейсмоакустические исследования на частотах 300—700 Гц.

На основании вышеприведенного можно сделать вывод, что поиски ореолов вторжения газов (ОВГ) в придонные отложения имеют важное значение для изучения процессов миграции углеводородов и прогноза на этой основе зон нефтегазонакопления. Поэтому после обработки и интерпретации данных дистанционных методов, обоснование поисковых возможностей которых дается в следующем разделе, в пределах выделенных нефтегазоперспективных участков перед постановкой сейсморазведочных работ рекомендуется проводить сейсмоакустические исследования.

Относительно невысокая стоимость гидроакустического и сейсмоакустического профилирования по сравнению с сейсморазведкой МОГТ, а также необходимость проведения этих работ при инженерно-геологических изысканиях на шельфе позволяют включить эти методы в комплекс поисково-разведочных работ на нефть и газ.

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Для включения в комплекс исследований по прогнозу нефтегазоносности северо-западного шельфа Черного моря рекомендуется использовать описываемые ниже дистанционные методы.

Эффективность применения дистанционных методов значительно повышается при комплексировании данных разновременной съемки и съемки в различных энергетических диапазонах. При этом необходимым условием создания эффективной методики поисков залежей УВ, основанной на использования дистанционных методов, является применение современных технологий совместной интерпретации информации, полученной из разных источников. В нашем случае такими технологиями становятся методики геоинформационного моделирования данных (оперирования данными) — ГИС-технологии.

Вопрос о характере аномалий физических полей морской поверхности, и в частности температурного поля, связанных с залежами углеводородов, наряду с рассмотрением механизмов их генерации, освещается уже более двадцати лет. Как правило, он рассматривается в отдельном контексте формирования температуры поверхности моря и причин ее дифференциации. Кроме того, неоднократно проводились измерения температурных аномалий, как в процессе комплексного изучения морской поверхности, так и непосредственно приуроченные к нефтегазопоисковым работам. Наконец, аномалии обнаруживаются при изучении космической информации — например, тепловых снимков с КА NOAA.

Однако применение дистанционных методов требует наличия достаточно эффективных информативных признаков, какими в данном случае являются параметры, характеризующие тепловые аномалии. Таким образом, из требования повышения эффективности информативных признаков следует необходимость создания специфических физико-математических моделей механизмов и процессов, формирующих эти признаки.

Становится актуальным построение универсальной общей модели формирования и поведения тепловой аномалии в жидкости. Такая модель должна быть многопараметрической, в виде набора систем формальных уравнений, созданной на основе общих гидромеханических и термодинамических представлений, анализе частных решений и эмпирических данных. То же самое можно сказать и об аномалиях поля отраженного от морской поверхности радиосигнала. Однако в этом случае комплексные исследования, ориентированные на поиски залежей УВ, не проводились.

Рассмотрим необходимые модели энергомассообменных процессов, формирующих в рассматриваемых природных системах информативный сигнал с целью установления некоторых общих закономерностей ассемблирования данных дистанционного зондирования при поисках месторождений углеводородов на шельфе.

Основой настоящего изложения послужили исследования, проводившиеся авторами в течение нескольких последних лет в рамках различных исследовательских программ и проектов в Центре аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины. Авторы выражают свою признательность коллегам из Немецкого космического агентства (DLR), Европейского космического агентства (ESA) и Европейского института космических исследований (ESRIN) за предоставленные материалы и поддержку, которая была оказана в рамках различных совместных проектов.

Целью данного исследования является разработка основ методологии дистанционного поиска нефтегазовых месторождений на шельфе с применением комплексирования данных дистанционного зондирования в разных энергетических диапазонах. Это позволяет значительно повысить эффективность поисков залежей нефти и газа. Для достижения этой цели необходимо рассмотреть задачу о

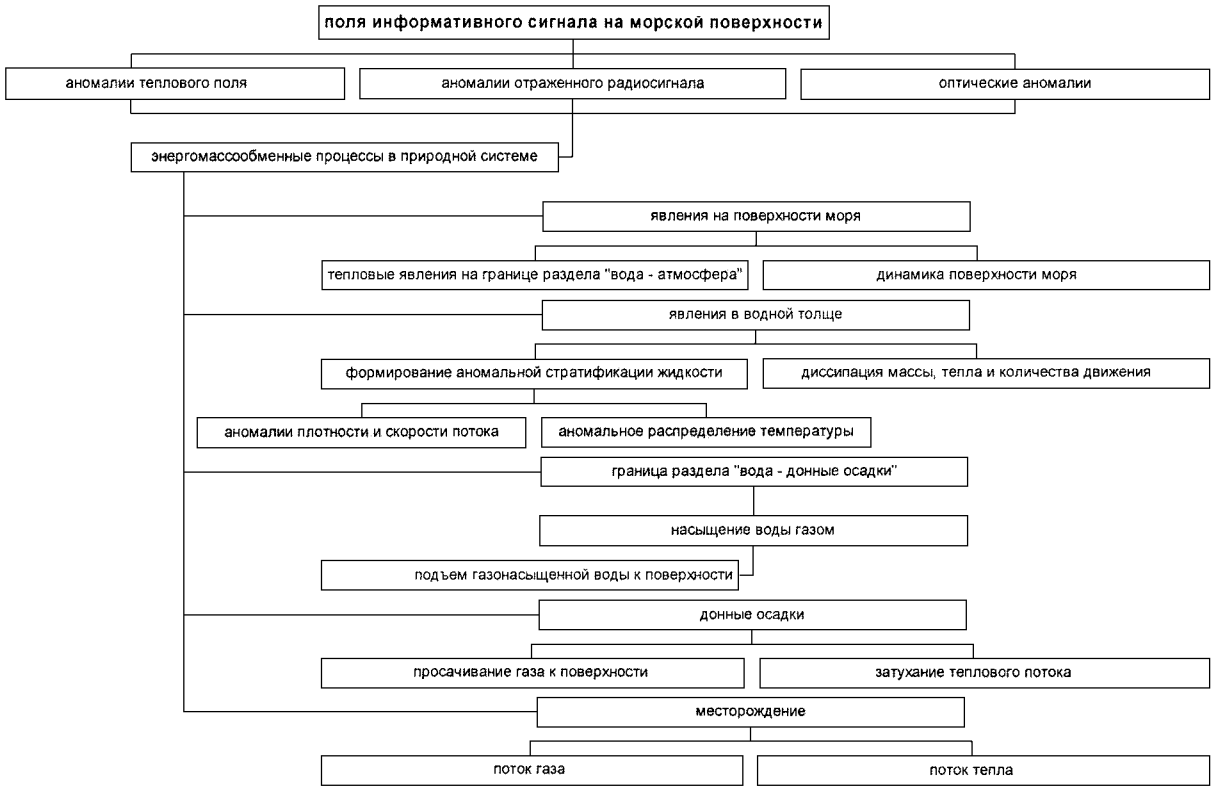


Диаграмма формирования информативного сигнала на морской поверхности

влиянии энергомассообменных процессов над залежами УВ на формирование информативных признаков, которые могут быть использованы при дистанционном зондировании. В этом случае должны быть рассмотрены следующие основные задачи:

— Создание формализованного описания рассматриваемой природной системы.

— Создание физической и математической моделей явлений, влияющих на формирование информативных признаков, получение набора формальных параметрических решений в виде модельных уравнений полей информационных признаков.

— Верификация полученной модели на основе анализа данных дистанционного зондирования.

Рассматриваемая природная система включает в себя: мигрирующие из залежи газы УВ и тепловой поток, а также толщу воды, ограниченную снизу донными осадками, а сверху — атмосферой. Кроме того, в случае активного микроволнового зондирования следует рассматривать параметры падающего и отраженного от поверхности моря излучения.

Формирование информативного сигнала на морской поверхности как результата совокупности протекающих в природной системе энергомассообменных процессов схематически может быть представлено в виде некоторой феноменологической диаграммы.

Основным процессом, определяющим формирование информативного сигнала, следует считать явление поднятия насыщенных газом слоев придонной жидкости на поверхность.

В этом случае поднимающиеся к поверхности насыщенные исходящим от залежи углеводородным газом массы глубинной воды сформируют на морской поверхности аномальное распределение температуры, плотности, поля скоростей и, соответственно, изменят характеристики теплового излучения и динамику морской поверхности, плотностные характеристики поверхностной воды и ее электрические характеристики. На возможности обнаружения этих изменений на фоне стационарного распределения физических полей на поверхности моря и базируется применение дистанционных методов при поисках месторождений УВ на шельфе.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД

Базовыми уравнениями в нашем случае следует считать классическую систему уравнений [6, 12]:

$$\frac{d}{dz}\left\{\langle w_j\rangle\frac{d}{dz}\langle w_j\rangle^2 z^2\right\} = -\frac{1}{K_m\rho}\frac{d\rho}{dz}g\langle w_j\rangle z^2\cos\theta;$$

$$\langle|\Delta w_j(\ln w_j)|^p\rangle = \tag{1}$$

$$= \int\prod_{i=1}^{n} d\gamma_i\{x\delta(\gamma - 0.5) + (1-x)\delta(\gamma-1)\}\gamma_1|V_n|^p,$$

где w_j — моментальная локальная скорость газожидкостной смеси, z — глубина, ρ — средняя плотность потока, θ — угол между вертикалью и направлением потока, gamma — плотность образования колмогоровских вихрей, V — локальный динамический объем, n и j — локальные координаты потока, p — вероятность образования вихря, δ — функция Дирака.

Граничные условия могут быть записаны в виде [14]:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right] - c_1\rho_1\frac{\partial}{\partial z}[\langle w_j\rangle T] + B = c_0\rho_0\frac{\partial T}{\partial\tau}, \tag{2}$$

где λ — теплопроводность, c_0 — теплоемкость и ρ_0 — плотность донных осадков, c_1 теплоемкость и ρ_1 — плотность воды, B — интенсивность источника тепла, τ — время, T — температура поверхности, описываемая на основе экспериментальных зависимостей. Тепловой поток через границу с атмосферой описывается уравнением [6, 14, 18, 9]:

$$q = -c_1\rho_1(\chi_1 + \varepsilon_1)\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tau}, \tag{3}$$

где χ_1 и ε_1 — коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводности воды, а усреднение температуры T происходит по ансамблю реализаций.

Рассмотрим более детально два основных процесса, ответственных за формирование информативного поискового сигнала на поверхности моря: процесс вертикальной миграции пузырьковой газожидкостной смеси (газлифтный процесс) и взаимодействие радиосигнала с морской поверхностью.

ЗАДАЧА О ДВИЖЕНИИ ПУЗЫРЬКОВОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ К ПОВЕРХНОСТИ; ГАЗЛИФТНЫЙ ПРОЦЕСС

Процесс подъема газожидкостного потока к поверхности — газлифтный процесс, может быть рассмотрен как представление задачи о движении газожидкостной смеси в рамках модели Прандтля со скольжением фаз [6].

Сформулируем основные допущения, в рамках которых была построена формальная модель:

— Движение газожидкостной смеси осуществляется в одном направлении;

— Движение является стационарным, хотя, возможно, что межфазный теплообмен нестационарен;

— Пузырьки представляются сферически-симметричными;

— Процессы межфазного обмена массой, теплом и количеством движения можем также считать сферически-симметричными;

— Межфазный массообмен считаем пренебрежимо малым;

— Считаем, что фазовых переходов нет;

— Начальные распределения температуры $T_1(z)$, давления $p_1(z)$, и плотности жидкости $\rho(z)$ считаем известными.

Тогда базовые уравнения, описывающие поведение неравновесной газожидкостной смеси, могут быть записаны следующим образом.

Во-первых, следует рассмотреть уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho_1\alpha_1)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho_1\alpha_1\mathbf{v}_1) = -Nj_{12}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho_2\alpha_2)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho_2\alpha_2\mathbf{v}_2) = Nj_{12}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla\cdot(N\mathbf{v}_2) = \Psi, \tag{6}$$

где N — количество пузырьков в единице объема смеси; j_{12} — эффективность переноса массы для одного пузырька; ρ_1, ρ_2 и v_1, v_2 — плотность и скорость соответственно для жидкой и газообразной фаз; Ψ — функция дробления, слипания, угасания пузырьков; t — время; α_1 и α_2 — объемные концентрации жидкой и газообразной фаз в смеси:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \tag{7}$$

В этом случае плотность равна

$$\rho = \rho_1\alpha_1 + \rho_2\alpha_2. \tag{8}$$

При допущении сферической симметричности пузырьков мы можем использовать для α_2 следующее уравнение:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_{20}\dfrac{N}{N_0}\left(\dfrac{R}{R_0}\right)^3}{\beta_1\left(1-\alpha_{20}\right) + \alpha_{20}\dfrac{N}{N_0}\left(\dfrac{R}{R_0}\right)^3}, \tag{9}$$

где α_{20}, N_0 — начальная концентрация и количество пузырьков; R — радиус пузырька; β_1 — коэффициент объемного изменения жидкости, определяемый как

$$\beta_1 = \frac{V_1}{V_{10}} = \frac{\rho_{10}}{\rho_1}\left[1 - \frac{j_{12}N(t-t_0)}{V_{10}\rho_{10}N_0}\right]. \tag{10}$$

Здесь V_{10}, V_1, ρ_{10}, ρ_1 — объем и плотность жидкости соответственно в начальный t_0 и текущий момент t.

Во-вторых, следует рассмотреть общее уравнение движения смеси в классической форме:

$$\rho_1\alpha_1\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_1\cdot\nabla)\right]\mathbf{v}_1\right\}=-\alpha_1\nabla p_1+\nabla^{\mathrm{k}}\tau_1^{\mathrm{k}}-$$
$$-N_{\mathrm{jg}}(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{v}}-\mathbf{v}_1)-N_{\mathrm{jg}}(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{g}}-\mathbf{v}_1)-N\mathbf{F}_{12}-\rho_1\alpha_1\mathbf{g}, \quad (11)$$

$$\rho_2\alpha_2\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_2\cdot\nabla)\right]\mathbf{v}_2\right\}=-\alpha_2\nabla p_2+\nabla^{\mathrm{k}}\tau_2^{\mathrm{k}}+$$
$$+N_{\mathrm{jv}}(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{v}}-\mathbf{v}_2)+N_{\mathrm{jg}}(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{g}}-\mathbf{v}_2)+N\mathbf{F}_{12}-\rho_2\alpha_2\mathbf{g}, \quad (12)$$

где $\alpha_1\nabla\rho_1$ и $\alpha_2\nabla\rho_2$ — обобщенные силы Архимеда — силы межфазного взаимодействия, обусловленные влиянием макрополей давления жидкости; $\nabla^{\mathrm{k}}\cdot\tau_1^{\mathrm{k}}$ и $\nabla^{\mathrm{k}}\tau_2^{\mathrm{k}}$ — силы, обусловленные тангенциальными напряжениями в фазах; $\tau_{1,2}^{\mathrm{k}}$ — тензор вязкого напряжения; $\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{v}}$ и $\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{g}}$ — скорости межфазного диффузного переноса; g — ускорение свободного падения; $\mathbf{F}_{12}$ — сила межфазного взаимодействия, обусловленная разными скоростями фаз.

Уравнение движения смеси может быть получено как сумма уравнений (11) и (12) без учета вязких напряжений:

$$\rho_1\alpha_1\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_1\cdot\nabla)\right]\mathbf{v}_1\right\}+\rho_2\alpha_2\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_2\cdot\nabla)\right]\mathbf{v}_2\right\}=$$
$$=-\nabla p_1-N_{\mathrm{j}12}(\mathbf{v}_2-\mathbf{v}_1)-\rho\mathbf{g}. \quad (13)$$

Таким образом, получается модель, где внутрифазные процессы протекают идеально, а межфазные взаимодействия вынесены за границу пузырька. Силы тангенциального напряжения пренебрежимо малы по сравнению с силами межфазного взаимодействия.

Уравнение притока тепла:

$$\rho_1\alpha_1\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_1\cdot\nabla)\right]c_{\mathrm{v}1}T_1\right\}=\frac{\alpha_1 p_1}{A\rho_1}\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_1\cdot\nabla)\right]\rho_1\right\}-$$
$$-\frac{N\mathbf{F}_{12}}{gA}(\mathbf{v}_2-\mathbf{v}_1)+Ng-$$
$$-Nj_{\mathrm{v}}\left[\frac{1}{gA}\frac{(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{v}}-\mathbf{v}_1)^2}{2}+(c_{\mathrm{vv}}T_{\mathrm{v}}-c_{\mathrm{v}1}T_1)\right]-$$
$$-Nj_{\mathrm{v}}\left[\frac{1}{gA}\frac{(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{g}}-\mathbf{v}_1)^2}{2}+(c_{\mathrm{vg}}T_{\mathrm{g}}-c_{\mathrm{v}1}T_1)\right]; \quad (14)$$

$$\rho_2\alpha_2\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_2\cdot\nabla)\right]c_{\mathrm{v}2}T_2\right\}=\frac{\alpha_2 p_2}{A\rho_2}\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_2\cdot\nabla)\right]\rho_2\right\}-$$
$$-Ng+Nj_{\mathrm{n}}\left[\frac{1}{gA}\frac{(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{v}}-\mathbf{v}_2)^2}{2}+(c_{\mathrm{vv}}T_{\mathrm{v}}-c_{\mathrm{v}1}T_1)\right]-$$
$$-Nj_{\mathrm{g}}\left[\frac{1}{gA}\frac{(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{g}}-\mathbf{v}_2)^2}{2}+(c_{\mathrm{vg}}T_{\mathrm{g}}-c_{\mathrm{v}1}T_1)\right]. \quad (15)$$

Здесь $c_{\mathrm{v}1}$, c_{vv}, c_{vg}, $c_{\mathrm{v}2}$ — теплоемкости жидкой фазы, пара, газа и парогазовой фазы соответственно при постоянном объеме; q — межфазный поток тепла; A — механический эквивалент тепловой энергии.

Запишем уравнение притока тепла для одного пузырька:

$$\frac{4}{3}\pi R^3\rho_2\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}+(\mathbf{v}_2\cdot\nabla)\right]c_{\mathrm{v}2}T_2\right\}=-\frac{p_2}{A}\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)+$$
$$+j_{\mathrm{v}}\left[\frac{1}{gA}\frac{(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{v}}-\mathbf{v}_2)^2}{2}+(c_{\mathrm{vv}}T_{\mathrm{v}}-c_{\mathrm{v}1}T_1)\right]+$$
$$+j_{\mathrm{g}}\left[\frac{1}{gA}\frac{(\mathbf{v}_{12}^{\mathrm{g}}-\mathbf{v}_2)^2}{2}+(c_{\mathrm{vv}}T_{2\mathrm{v}}-c_{\mathrm{v}1}T_1)\right]-q. \quad (16)$$

Основное уравнение движения смеси (в случае стационарного потока) в рамках модели Прандтля может быть представлено как

$$(\rho_1\alpha_1+\rho_2\alpha_2)\left(v\frac{dv}{dz}+g\cos\theta\right)+g\frac{dp_1}{dz}=0, \quad (17)$$

$$p_1=p_2-2\sigma_1/R, \quad (18)$$

$$p_2=\rho_2 BT_1. \quad (19)$$

Здесь B — газовая константа, θ — угол между вектором скорости и вертикалью.

Допустим, что разница давлений в пузырьке и окружающей жидкости пренебрежимо мала. Тогда общее решение этих уравнений может быть получено в виде

$$v\frac{dv}{dz}+\frac{1}{(m_1+m_2)}\left[\frac{m_1}{\rho_1}+\frac{m_2BT_2}{p(z)}\right]\frac{dp(z)}{dz}\cos\theta=0. \quad (20)$$

Решение этого уравнения является представлением Прандтля движения газожидкостной смеси. Базовое уравнение модели Прандтля имеет вид

$$(\rho_1\alpha_1+\rho_2\alpha_2)v\frac{dv}{dz}+g\left[\frac{dp}{dz}+(\rho_1\alpha_1+\rho_2\alpha_2)\cos\theta\right]=0. \quad (21)$$

Кроме того, следует рассмотреть уравнение состояния и уравнение сохранения массы пузырька.

Примем во внимание феномен скольжения фаз, когда $v_1\neq v_2$. Скольжение зависит от размера пузырька следующим образом:

$$v_2-v_1=k_{\Delta v}v^{[0]}, \quad (22)$$

где $\tilde{R}$ — средний радиус пузырька, который мы можем брать в пределах 0.3—0.7 мм; скорость $v^{(0)}$ берется при постоянной глубине, на которой температура смеси постоянна; мы можем определять ее в пределах 4—10 м/с.

Уравнение скольжения фаз может трансформировано как

$$\rho_1\alpha_1v_1\frac{dv_1}{dz}+\rho_2\alpha_2v_2\frac{dv_2}{dz}=$$
$$=\left[(\rho_1\alpha_1+\rho_2\alpha_2)\cos\theta+\frac{dp}{dz}\right]g. \quad (23)$$

Решение уравнения в стандартной системе координат приводит к отношению между скоростями

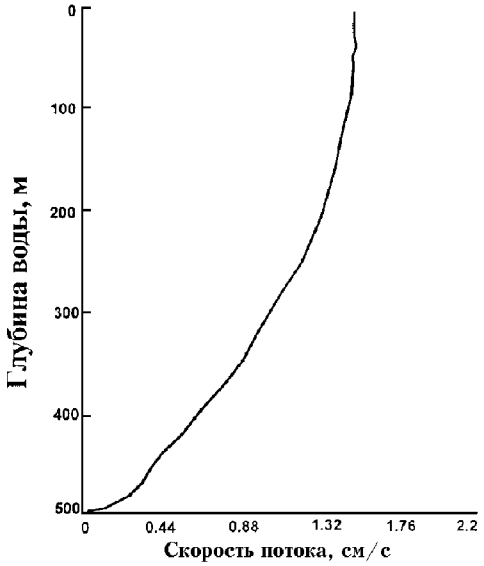


Рис. 4. Результат моделирования движения газожидкостного потока: распределение скорости потока с глубиной (пузырьки радиуса $R = 5$ мм, интенсивность потока пузырьков 500 $м^{-2}с^{-1}$)

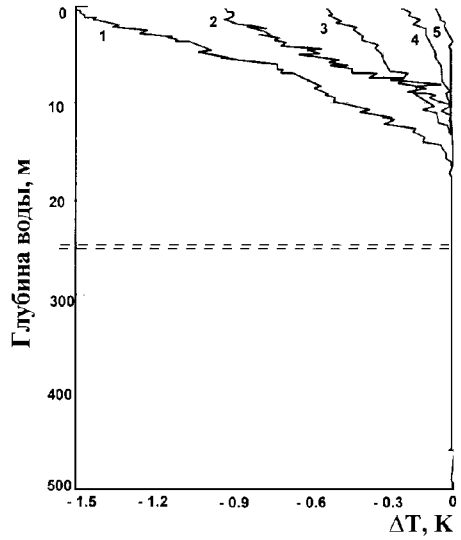


Рис. 5. Результат моделирования движения газожидкостного потока: распределение аномалии температуры жидкости, обусловленное газлифтом. Радиус пузырька $R = 5$ мм; интенсивность потока, пузырьки $м^{-2}с^{-1}$: 1 — 2700, 2 — 1900, 3 — 1200, 4 — 500, 5 — 50

фаз, их массой и глубиной z:

$$z = \int \frac{p^{1/3}}{A_1}\left\{\frac{A_2[(A - Bp - c\ln p)^{1/2} + D]}{p} - \right.$$

$$\left. - A_3 + \frac{A_2(B - c/p)}{2(A - Bp - c\ln p)^{1/2}}\right\}dp + c', \qquad (24)$$

где c' — постоянная интегрирования, а буквенные коэффициенты определяются в виде

$$A = \left(w_{10} + \frac{a}{K_m + 1}\right) + \frac{2K_m p_0 g}{\rho_{10}(K_m + 1)} + \frac{2gp_0 \ln p_0}{\rho_{20}(K_m + 1)},$$

$$A_1 = \frac{3}{8}\frac{c_x a^2}{R_0 \rho_0^{1/2}}, \quad A_2 = \mu a, \quad A_3 = \frac{g}{\rho_{10}}, \qquad (25)$$

$$c = \frac{2gp_0}{\rho_{20}(K_m + 1)}, \quad D = \frac{aK_m}{K_m + 1}, \quad B = \frac{2gK_m}{\rho_1(K_m + 1)},$$

где μ — коэффициент присоединенной массы; K_m — массовое отношение фаз: m_1/m_2; $a = v_2 - v_1$; c_x — коэффициент сопротивления пузырька в жидкой фазе. Можно также использовать упрощенное уравнение

$$v_1 = \left[v_{10}^2 + \frac{2p_0}{\rho_{20}K_m}\ln p(z) - \frac{p(z) - p_0}{\rho_1}\right]^{1/2}. \qquad (26)$$

Приведенные уравнения позволяют описать поведение газожидкостного потока при любом значении координаты z.

Результат моделирования движения газожидкостного потока представлен на рис. 4 и 5.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОСИГНАЛА С МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассмотрение этого вопроса основано на подходе, разработанном M. Donelan, W. Person, и J. W. Wright, изложенном в [7, 9].

Первичным механизмом, ответственным за формирование поля отраженного морской поверхностью радарного сигнала, можно считать резонанс Брагга [7, 9].

Уравнение Брагга может быть записано как

$$\lambda_s = \frac{\lambda_r}{2\sin\theta}, \qquad (27)$$

где λ_s и λ_r длины волн морской поверхности и радара, θ — локальный угол падения.

Критерий рассеяния Брагга:

$$\lambda'_s = \frac{\lambda_r \sin\varphi}{2\sin\theta} = \lambda_s \sin\varphi, \qquad (28)$$

где λ'_s — длина поверхностной волны, распространяющейся под углом φ к направлению излучения радара.

Кроме того, коэффициент отражения R равен

$$R = \frac{R_1(\varepsilon_1) + R_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)\exp(-2ikz_1\sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2\theta})}{1 + R_1(\varepsilon_1)R_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)\exp(-2ikz_1\sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2\theta})}. \qquad (29)$$

где R_1 и R_2 коэффициенты Френеля, которые зависят от угла падения θ и граничных условий; $\varepsilon_{1,2}$ граничная диэлектрическая константа; $z_{1,2}$ — координаты глубины слоя проникновения. Диэлектрическая константа газожидкостной смеси может

быть рассмотрена, согласно [9], как

$$\varepsilon = \varepsilon_w \left[1 + \frac{\rho_g}{(1 - \rho_g)/3 + \varepsilon_w/(\varepsilon_g + \varepsilon_w)} \right]. \quad (30)$$

Или, упрощенно для сантиметровых волн [9]:

$$\sqrt{\varepsilon} = \rho_g + (1 - \rho_g)\sqrt{\varepsilon_w}, \quad (31)$$

где ε_w — значение для жидкой компоненты и ε_g — для газообразной; ρ_g — плотность газа.

Таким образом, в качестве поискового признака следует рассматривать локальное изменение электрических характеристик морской поверхности, приводящее к изменению коэффициента отражения согласно (29).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как следует из приведенных моделей, основным процессом, ответственным за формирование аномалий на поверхности моря над залежью, является газлифтное поднятие глубинных вод к поверхности [1, 3, 7].

Результирующее распределение аномалии температуры воды с глубиной представлено на рис. 6.

На основе описанных представлений строится методика моделирования, которая позволяет описать формирование поисковых признаков нефтегазовых залежей и их энергетические и пространственные характеристики, что необходимо для корректной и адекватной интерпретации данных дистанционного зондирования шельфа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Применение специальных методов дешифрирования и интерпретации тепловых снимков морской поверхности (NOAA/AVHRR, 10.3—11.3 мкм), разработанных в ЦАКИЗ, показывает возможность выявления аномалий, приуроченных к шельфовым месторождениям углеводородов. Во-вторых, радиолокационные съемки морской поверхности в рамках рассматриваемой задачи позволяют исследовать механизмы естественного энергомассопереноса в верхнем слое моря (распределение аномалий, обусловленной метеофакторами, зоны течений, распределение внутренних волн и термически активных поверхностных явлений, например, нефтяных пятен и т. д.). Также доказана возможность обнаружения аномальных распределений отраженного радиосигнала над шельфовыми залежами углеводородов.

В качестве примера обнаружения индуцированных описанными процессами аномалий физических

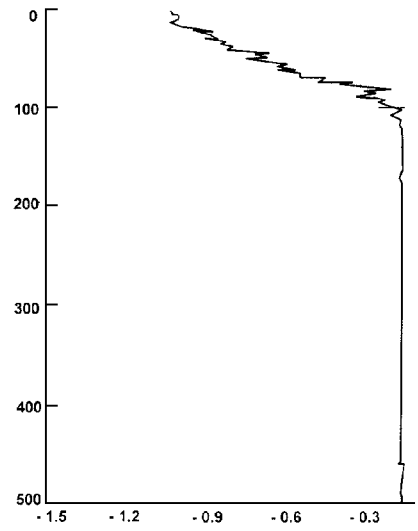


Рис. 6. Результат моделирования распределения аномалии температуры воды над залежами углеводородов

полей морской поверхности, рассмотрим несколько спутниковых снимков, полученных различными космическими станциями в разное время. Аномалии теплового поля морской поверхности северо-западного шельфа Черного моря показаны на рис. 7, динамика поверхности Черного моря — на рис. 8.

Возможности детектирования аномалий отраженного радиосигнала на морской поверхности над месторождениями нефти и газа по данным космической съемки показаны на рис. 9.

Аномалии, показанные на рис. 9, соответствуют известным месторождениям Голицынское и Южно — Голицынское на Северо-западном шельфе Черного моря.

Предлагаемая методика была апробирована ЦАКИЗ в качестве независимой поисковой технологии на различных мировых нефтегазоносных бассейнах, сильно отличающихся по природным условиям. Методика успешно применялась для исследований шельфовых зон Черного и Северного морей, акватории Азовского и Каспийского морей (зоны экономических интересов Казахстана и Туркменистана), шельфа и континентального склона Атлантического океана (Бразилия, Аргентина). Во всех случаях была показана достаточно высокая эффективность применения рассматриваемой методики.

ВЫВОДЫ

На основаниии вышеизложенного можно предло-

Рис. 7. Тепловой снимок NOAA/AVHRR северо-западной части Черного моря, полученный 15.06.93 в 03^h14^m: *а* — до обработки, *б* — после процедуры визуализации (ранжирования энергетических уровней)

Рис. 8. Поле отраженного радиосигнала поверхности Черного моря: *а* — снимок ERS 1 SAR PRI, 17.06.1995, 08^h33^m; *б* — снимок ERS 1 SAR PRI, 24.06.1993, 08^h34^m

Рис. 9. Поле отраженного радиосигнала поверхности Черного моря: *а* — снимок ERS 1 SAR PRI, 11.10.1995, $8^h45^m20^s$; *б* — тот же снимок после применения процедуры визуализации (медианная фильтрация и ранжирование энергетических уровней); *в*, *г* — то же для снимка снимок ERS 1 SAR PRI, 11.10.1995, $8^h45^m05^s$

жить следующую последовательность комплексирования дистанционных и геофизических методов при прогнозе нефтегазоносности в пределах северо-западного шельфа Черного моря на основе изучения зон повышенной флюидопроводимости, связанных с залежами нефти и газа.

На первом этапе комплексных исследований используются дистанционные методы. В зависимости от этапности исследований (региональный или детальный) применяются различные варианты дистанционных методов.

На втором этапе исследований исполь-зуются многочастотное гидроакустическое (на частотах 36 и 3.5 кГц) и сейсмоакустическое профилирование (на частотах 300—500 Гц). Эти методы обеспечивают более высокую разрешающую способность при поисках зон повышенной флюидопроводимости (в том числе зон глубинных разломов, или систем более мелких разрывных нарушений, а также зон повышенной трещиноватости), газовых выделений и ореолов вторжения УВ. На этом этапе на основе совместной обработки и анализа данных первого и второго этапов выделяются нефтегазоперспективные зоны.

На третьем этапе поисков в пределах выделенных нефтетегазоперспективных участков проводятся детальные сейсморазведочные работы, результаты которых используются для прогноза ловушек различных морфогенетических типов, а также зон вертикальной миграции флюидов на основе изучения по данным сейморазведки изменений амплитуд отражений за счет влияния диффузионно-эффузионного потока УВ на акустические свойства геологического разреза. Данные сейсморазведки МОГТ используются также для прогноза зон аномальных тектонических напряжений, а также зон повышенной трещиноватости на основе детального изучения интервальных скоростей и поглощения.

На четвертом этапе поисков проводится нефтегазопоисковое бурение, геофизические исследования скважин, а также комплексный анализ данных, полученных в результате бурения. Эта информация в комплексе с даными первых трех этапов используется для построения модели миграции УВ и прогноза зон нефтегазонакопления в регионе, а также для подготовки рекомендаций по направлениям работ.

Все исследования должны проводиться в одной и той же системе координат, что позволит упростить совместную обработку и анализ данных.

1. Воробйов А. І., Карпенко І. І. Аналіз можливостей урахування латеральних змін сейсмічних швидкостей при підготовці об'єктів до глибокого буріння на нафту і газ (в умовах північно-західного шельфу Чорного моря) // Геодинамика и нефтегазоносные системы Черноморско-Каспий-ского региона: Третья междунар. конф., Гурзуф, 17—21 сентября 2001 г.
2. Воробьев А. И. Новые данные о рельефе морского дна северо-западной части Черного моря // Геология и полезные ископаемые Черного моря. — Киев: ОМГОР НАН Украины, 1999.—С. 268—271.
3. Димитров Л. И. Газово-акустические аномалии осадочного чехла Болгарского шельфа Черного моря // Геологическая эволюция западной части Черноморской котловины в неоген-четвертичное время. — София: Изд-во Болг. АН, 1990.—С. 362—380.
4. Довжок Э. М., Шпак П. Ф., Бялюк О. Ф. та ін. Нафтогазоносний потенціал північно-західного шельфу Чорного моря. — Київ, 1995.
5. Кеннет Дж. П. Морская геология: В 2 т. — М.: Мир, 1987.—Т. 1.—397 с.
6. Костюченко Ю. В. Модель формирования теплового поискового сигнала при дистанционных поисках шельфовых нефтегазовых месторождений // Докл. НАН Украины.—1997.—**35**.—С. 45-47.
7. Костюченко Ю. В., В. И. Лялько, Перерва В. М. Теоретико-методические основы и результаты поиков газовых месторождений на шельфе Черного моря с использованием космических сьемок // Геология и полезные ископаемые Черного моря. — Киев, 1999.—С. 32—39.
8. Kostyuchenko Yu., Kitchka A. Environmental Hazards Assessment Case Study for the Ukraine's Offshore // AAPG Internat. Conf.—1999.—P. 31.
9. Костюченко Ю. В. Информационное моделирование для дистанционных поисков нефти и газа на шельфе // «Новые методы в космическом землеведении». — Киев, 1999.—С. 71—79.—(Препринт / НАН Украины. ЦАКИЗ).
10. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. — М.: Мир, 1988.
11. Лялько В. И. Тепломассоперенос в литосфере. — Киев: Наук. думка, 1985.—260 с.
12. Лялько В. И., Перерва В. М., Костюченко Ю. В. Об эндогенной составляющей в температурной дифференциации поверхности Черного моря // Геологический журн.—1995.—№ 3.—С. 24—38.
13. Молисмология Черного моря / Отв. ред. Г. Г. Поликарпова. — Киев: Наук. думка, 1992.—304 с.
14. Мудрецов В. Б., Жильцов А. М. Аномальные сейсмоакустические зоны на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Тихоокеанская геология.—1990.—№ 3.—С. 108—112.
15. Николаев П. Н. Методика тектонодинамического анализа. — М.: Недра, 1992.—295 с.
16. Перерва В. М., Лялько В. И., Шпак П. Ф., и др. Новые данные о разломно-блоковой структуре северо-западной части Черного моря по данным аэрокосмогеологическких исследований в связи с их нефтегазоносностью // Геологический журн.—1994.—№ 4—6.—С. 78—85.
17. Перерва В. М., Лялько В. И., Архипов А. И. и др. Прямой поиск залежей нефти и газа дистанционными методами (предварительный опыт, перспективы развития). — Киев, 1995.—83 с.—(Препринт / НАН Украины. Институт геологических наук).
18. Перерва В. М., Лялько В. И., Шпак П. Ф. и др. Информация ИСЗ «Сич-1» в решении актуальных проблем нефтегазовой геологии // Космічна наука і технологія.—1996.—**2**, № 3—4.—С. 49—54;
19. Перерва В. М., Лялько В. И., Шпак П. Ф. Флюидопроводящие структуры и нефтегазоносность Азово-Черноморского региона // Докл. НАН Украины.—1997.—№ 4.—С. 136—139;
20. Перерва В. М. Вероятная природа линеаментов, выявляемых аэрокосмическими методами // Геологический журн.—1999.—№ 1.—С. 66—76.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 166—169

j21. Селиверстов Н. И. Сейсмоакус-тические исследования переходных зон. — М.: Наука, 1987.—109 с.
22. Тимошин Ю. В., Семенова С. Г. Закономерности отображения в волновых сейсмических полях эпигенетического преобразования отложений вокруг залежей нефти и газа // Геология нефти и газа.—1992.—№ 11.—С. 36—41.
23. Шнюков Е. Ф., Пасынков А. А., Клещенко С. А. и др. Газовые факелы на дне Черного моря. — Киев: ОМГОР НАНУ, 1999.
24. Шпак П. Ф., Чебаненко И. И., Клочко В. П. и др. Оценка нефтегазоносного потенциала подводных недр Черного и Азовского морей с позиций разломно-блоковой тектоники. — Киев, 1993.—63 с.—(Препринт / НАН Украины. ИГН).
25. Шрейдер А. А., Казьмин В. Г., Финетти И. и др. Особенности осадко-накопления в Черном море // Океанология.—2001.—**41**, № 3.—С. 437—446.
26. Юдин В. В., Герасимов М. Е. Геодинамическая модель Крымско-Черно-морского и прилегающих регионов // «Геодинамика Крымско-Черноморского региона»: Сб. матер. конф. — Симферополь, 1997.—С. 16—23.
27. Donelan M., Person W. Radar Scattering and equilibrium ranger in wind-generated waves with applications to scatterometry // J. Geophys. Res.—1987.—**92**.—P. 5.
28. Wright J. W. Detection of ocean waves by microwave radar: the modulation of short gravity-capillary waves // Bound. Layer Meteorol.1978.—**13**.—P. 87—105.

Наземная заверка результатов дистанционного зондирования гидрогеологических объектов

В. Н. Подорван, Ю. Ф. Филиппов

Центр аэрокосмических исследований земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), в частности СВЧ-зондирование, позволяет оперативно решать региональные гидрогеологические и гидрологические задачи.

К ним относятся прежде всего задачи определения влажности пород (почвогрунтов) зоны аэрации; глубин залегания уровней грунтовых вод (УГВ); обследование районов подтопления (заболачивания), примыкающих к закрытым шахтам; изучение водного баланса на орошаемых массивах, вдоль трасс каналов, в районах водохранилищ, отстойников сточных вод и других естественных и техногенных водных объектов.

Для региональных задач ДЗЗ является вполне обоснованным, так как размеры объектов соизмеримы с масштабами аэрокосмических съемок.

При съемках локальных объектов возникают определенные затруднения, требующие подтверждения результатов ДЗЗ путем проведения наземных исследований на создаваемых тестовых (эталонных) участках.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИН ЗАЛЕГАНИЯ УРОВНЕЙ ГРУНТОВЫХ ВОД

При определении глубин залегания УГВ сигнал СВЧ-зондирования проникает на глубину до 2 м от поверхности земли [6]. В то же время в естественных условиях почвогрунт всегда содержит некоторое количество влаги. В ненасыщенных почвогрунтах влага может адсорбироваться на поверхности частиц, испаряться, передвигаться в виде пленки под действием капиллярных и гравитационных сил. При этом чем меньше размеры частиц почвогрунта, тем больше поверхность капиллярной влаги в сравнении с ее массой, и следовательно, тем большую роль играют менисковые силы по отношению к силе тяжести. Заполняя сечения капилляров, влага передает гидростатическое давление и при разности напоров в двух точках передвигается. Движение влаги вверх происходит под воздействием капиллярных сил от УГВ на высоту, соответствующую силе капилярного всасывания, образуя капиллярную зону.

В связи с вышесказанным, СВЧ-сигнал фиксирует лишь верхнюю границу капиллярной каймы.

При полном смачивании частиц высота капиллярного подъема влаги по действием капиллярных сил от УГВ по пористой среде может быть определена по формуле Жюрена [3]

$$h = 2\eta/(g\rho R) = 0.15/R, \qquad (1)$$

где h — высота капиллярного поднятия, см; η — поверхностное натяжение воды, Н/м; g = 9.8 м/с^2 — ускорение свободного падения; ρ — плотность воды, кг/м^3; R — радиус капиллярного промежут-

© В. Н. ПОДОРВАН, Ю. Ф. ФИЛИППОВ, 2002

ка.

В природных условиях высота капиллярного поднятия для средне- и крупнозернистых песков составляет 5—10 см, мелкозернистых — 30 см для пылеватых песков и супесей — до 1 м, в легких суглинках — до 2 м, в легких глинах — до 3—5 м, что не в полной мере соответствует расчетным значениям согласно формуле (1).

Причиной указанных расхождений является отсутствие в приведенной зависимости учета силы трения и изменения диаметра капилляров по вертикали, поэтому почвогрунты необходимо рассматривать как систему, состоящую, в частности, из пор двух размеров: крупных ненасыщенных, в пределах которых преобладает гравитационное движение воды, и мелких, в которых доминирующим является капиллярное течение. В такой постановке данную задачу, за исключением самых простых и скорее неправдоподобных случаев, можно решить только численными методами. В большинстве случаев численные расчеты свидетельствуют о том, что движущийся фронт увлажнения имеет четко выраженный характер [3]. При поступлении воды на земную поверхность происходит ее просачивание вниз, заполнение всех пор или только части их. Схема распределения влаги от поверхности до УГВ может быть представлена в виде трех основных зон:

I — зона, содержащая грунтовую воду, или зона полной влагоемкости (ПВ);

II — зона капиллярной влагоемкости, в которой влага гидравлически связана с грунтовыми водами и может изменять свое высотное положение в зависимости от УГВ;

III — зона наименьшей влагоемкости, в которой механизм удержания подвешенной влаги зависит главным образом от механического и агрегатного состава почвогрунта.

Таким образом, при СВЧ-зондировании возможны очень существенные ошибки определения глубин залегания УГВ, что в свою очередь требует внесения соответствующих поправок на величину капилярного поднятия.

ОБСЛЕДОВАНИЕ РАЙОНОВ ПОДТОПЛЕНИЯ, ПРИМЫКАЮЩИХ К ЗАКРЫТЫМ ШАХТАМ

В настоящее время возникла проблема мониторинга в районах подтопления (заболачивания) обширных территорий, прилегающих к угольным шахтам, выводимым из эксплуатации способом «мокрой консервации».

Остановка горных работ на закрываемой шахте приводит к обрушению или прогибу очистных выработок и постепенному прогибанию верхних подземных пустот и разуплотнений, что вызывает проседание дневной поверхности на 3—7 м [5].

В свою очередь, прекращение водоотлива ведет к достаточно быстрому заполнению водой всей системы подземных пустот и разуплотнений, образующих неустойчивый водный бассейн.

Завершение подобного процесса приводит к повышению уровней воды в шахтных стволах (пропускная способность которых намного выше пропускной способности окружающих пород) и формированию «купола» подземных вод. После этого шахтный ствол становится областью «питания» грунтовых вод, что приводит к выводу из строя сельскохозяйственное водоснабжение (колодцы). Разгрузка шахтных вод в гидрографическую сеть также вызывает повышение минерализации речных вод.

Для принятия мер по локализации подобных процессов требуется изучение явления подъема УГВ, определения его причин и разработка соответствующих математических методов оценки количества воды, поступающей в шахтный колодец, скорости и сроков ее поступления.

Расчет шахтных стволов, работающих в различных гидрогеологических условиях, заключается в определении уровня подземных вод при принятом водопритоке. При этом величина водопритока в шахтные стволы принимается либо постоянной, либо изменяющейся по определенному закону.

Шахтные поля представляют собой систему из нескольких шахт, каждая из которых имеет свой отдельный ствол. В связи с этим нами рассматриваются расчетные зависимости для систем шахтных стволов. Рассмотрены два случая: а) одиночный шахтный ствол; б) группа взаимодействующих шахтных стволов. В последнем случае расчет может быть произведен как с учетом работы каждого конкретного ствола, так и путем замены реальной системы расположения стволов обобщенной системой («большим колодцем») с последующим использованием с определенными изменениями зависимостей для отдельных стволов.

Для расчета шахтных стволов при заданном постоянным водопритоке в каждый конкретный ствол основной является обобщенная формула

$$S = \frac{Q_{\text{СУМ}}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{N} \beta_i R_i, \qquad (2)$$

где S — расчетное понижение уровня; $Q_{\text{СУМ}}$ — суммарный водоприток в шахтные стволы; km — водопроводимость пласта; $\beta_i = Q_i/Q_{\text{СУМ}}$ (Q_i — водоприток в i-й ствол, $i = 1, 2, \ldots, N$); R_i — фильтрационное гидравлическое сопротивление, зависящее от геометрии границ пласта, условий на границах, расстояния между стволами и других факторов.

Необходимо отметить, что использование форму-

лы (2) правомерно только для напорных горизонтов. Ее использование для безнапорных и напорно-безнапорных горизонтов может привести к серьезным ошибкам, так как при этом не учитывается уменьшение мощности водоносного горизонта.

Расчетные зависимости для определения гидравлических сопротивлений и понижений в шахтных стволах в различных гидрогеологических условиях приведены ниже.

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКОВ В ОДНОРОДНОМ НЕОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ ПРИ Q = CONST

Как известно, при соблюдении условия $r_i^2/4at \le 0.1$ гидравлическое сопротивление R, входящее в формулу (2), от действия каждого шахтного ствола определяется логарифмическим приближением

$$R_i = \ln \frac{2.25at_i}{r_i^2}, \qquad (3)$$

где r_i — расстояние от шахтного ствола, вызывающего понижение уровня, до рассматриваемой точки; t_i — время работы этого ствола до конца расчетного периода; a — коэффициент пьезопроводности пласта.

Таким образом, для расчета взаимодействующих стволов при постоянном водопритоке, можно использовать следующую модификацию формулы (2):

$$S = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{N} \beta_i \ln \frac{2.25at_i}{r_i^2}. \qquad (4)$$

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКА В ШАХТНЫЙ СТВОЛ В ОДНОРОДНОМ НЕОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ ПРИ Q = F(T)

При скачкообразном изменении дебита предполагается, что весь расчетный период эксплуатации шахты («большого колодца») может быть разбит на N временных интервалов, в течение которых дебит сохраняется постоянным и равным Q_i (в отдельных случаях Q_i может быть равным нулю).

Скачкообразное изменение расхода вызывает соответсвующие изменения уровня воды. В этом случае величина понижения уровня в любой момент времени t от начала работы шахты согласно методу наложения течений будет равна алгебраической сумме понижений, вызываемых скачками дебита $Q_i - Q_{i-1}$ в течение соответствующего времени $t_i - t_{i-1}$:

$$S = \frac{Q_n}{4\pi km} R, \qquad (5)$$

$$R = \sum_{i=1}^{N} \beta_i E_i \left[-\frac{r^2}{4a(t - t_{i-1})} \right], \qquad (6)$$

$$\beta_i = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{Q_n}, \qquad (7)$$

где Q_n — расход ствола («большого колодца») в течение последнего времени эксплуатации; R_C — гидравлическое сопротивление при скачкообразном изменении водопритока.

При определении понижения S в расчетном стволе («большого колодца») или в пределах обобщенной системы значение r в формуле (2) принимается соответственно радиусу ствола r_C или «большого колодца» r_K.

Если

$$\frac{r^2}{4a(t - t_{i-1})} \le 0.1,$$

то зависимость гидравлического сопротивления от времени будет логарифмической, что можно выразить следующим образом:

$$R_C = \ln \left(\frac{2.25a}{r^2} \right)^{\Sigma\beta_i} t_{\text{пр}}, \qquad (8)$$

$$t_{\text{пр}} = (t - 0)^{\beta_1} (t - t_1)^{\beta_2} \dots (t - t_{n-1})^{\beta_n}, \qquad (9)$$

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКОВ В ШАХТНЫЕ СТВОЛЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТАХ

Условия влияния прямолинейных границ на работу шахтных стволов основан на методе зеркальных отражений. С помощью этго метода реальный полуограниченный или ограниченный пласт заменяется условным неограниченным пластом, в котором по контуру границы сохраняется реальное граничное условие. Последнее достигается введением в расчет отображенных стволов с дебитами, реальных и противоположными по знаку в случае границы с ГУ-1 (H = const), одинаковыми — с ГУ-II (q = 0).

Полуограниченный пласт (ГУ-1, H = const). При расчете системы взаимодействующих стволов с учетом действия каждого ствола величина понижения уровня определяется по формуле, аналогичной выражению (1):

$$S = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km} \sum_{i=1}^{N} \beta_i R_i, \qquad (10)$$

$$R_i = \ln \frac{\rho_i}{r_i}, \qquad (11)$$

где r_i — расстояние между расчетным стволом и стволом, имеющим номер i (для расчетного ствола

$r_i = r_c$ — радиус ствола); ρ_i — расстояние от расчетного ствола до отображения ствола с номером i относительно границы постоянного напора.

Как следует из формулы (11), при наличии контура постоянного напора движение подземных вод стабилизируется, и понижение не зависит от времени. Формула (11) действительна при

$$\frac{r_i^2}{4at} \le 0.1 \quad \text{и} \quad \frac{\rho_{imax}}{4at} \le 0.1.$$

Полуограниченный пласт (ГУ-II, $q = 0$). Понижение уровня воды при работе системы взаимодействующих шахтных стволов рассчитывается по формуле (10). Входящая в эту формулу величина R_i определяется по следующей зависимости:

$$R_i = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left[-E_i\left(-\frac{r_i^2}{4at_1}\right) - E_i\left(-\frac{\rho_i^2}{4at_1}\right)\right].$$

При

$$\frac{r_{imax}^2}{4at} \le 0.1 \quad \text{и} \quad \frac{\rho_{imax}}{4at} \le 0.1$$

формула преобразуется следующим образом:

$$R_i = \ln\frac{2.25at_i}{r_i\rho_i}.$$

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКОВ В ШАХТНЫЕ СТВОЛЫ В НЕОДНОРОДНЫЕ В ПЛАНЕ ПЛАСТЫ (ПРЯМОЛИНЕЙНАЯ ГРАНИЦА РАЗНОРОДНЫХ ЗОН)

В этой схеме неоднородный неограниченный пласт в плане состоит из двух зон с различными значениями водопроводимости и пьезопроводности, которые разделены прямолинейной границей. Условие на этой границе рассматриваются как условие IV рода.

При длительных водопритоках ($a_1 t / L_T^2 \ge 100$, где L_T — расстояние до границы) понижение уровня в стволе, расположенном в первой зоне, может быть рассчитано по формуле

$$S = \frac{Q}{4\pi(km)_{CP}}\left[\ln\frac{2.25a_1 t}{2L_T r_C} + \nu\ln\frac{2L_T}{r_C} + \frac{(1+\nu)\lambda}{2}\right],$$

$$(km)_{CP} = \frac{(km)_1 + (km)_2}{2},$$

$$\nu = \frac{(km)_2}{(km)_1},$$

где $(km)_1$ и a_1 — водопроводимость и пьезопроводность зоны, в которой расположен откачиваемый ствол; $(km)_2$ и a_2 — водопроводимость и пьезопроводность второй зоны; λ — функция, зависящая от соотношения пьезопроводностей.

Таким образом, аналитические расчеты в первом приближении позволяют определить водопритоки в шахтные стволы, оценить расчетные параметры, а также определить граничные условия для последующего создания прогнозных гидрогеологических моделей районов подтопления, примыкающих к закрытым шахтам.

1. Блески Дж. Р., Илз К. В. О. Модели водосборных бассейнов с сосредоточенными параметрами // Гидрогеологическое прогнозирование. — М.: Мир, 1988.—С. 381—430.
2. Боревский Б. В., Дробноход Н. И., Язвин Л. С. Оценка запасов подземных вод. — Киев: Выща школа, 1989.— 407 с.
3. Гушля А. В., Мезенцев В. С. Воднобалансовые исследования. — Киев: Вища школа, 1982.—229 с.
4. Керкби М. Дж. Гидролого-гидрогеологические условия склонов // Гидрогеологическое прогнозирование. — М.: Мир, 1988.—С. 54—102.
5. Черный Г. И. Классификация метематических моделей для разных задач механики горных пород // Использование взрыва в народном хозяйстве. — Киев: Наук. думка, 1990.—Ч. III.—С. 28—36.
6. Шмюгге Т. Дистанционные методы определения влажности почв // Гидрогеологическое прогнозирование. — М.: Мир, 1988.—С. 133—160.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 170—173

Особливості комплексування дистанційних та традиційних геологічних методів при пошуках руд кольорових металів

В. Є. Філіпович[1], В. Л. Приходько[2], Д. О. Тарангул[1]

[1]Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

[2]Північне державне регіональне геологічне підприємство «Північгеологія», Київ

Нагальна потреба забезпечення України власними сировинними ресурсами вимагає впровадження у практику геолого-пошукових робіт нетрадиційних методів дослідження геологічного середовища. Одним із таких методів є дистанційне зондування Землі на основі використання мультиспектральної аерокосмічної інформації високої роздільної здатності. Історія застосування матеріалів ДЗЗ у пошуковій, зокрема рудній геології налічує багато років. Незважаючи на виконані великі об'єми дешифрування, особливо при геологічній зйомці, воно, як правило, обмежувалось структурно-тектонічним та структурно-формаційним дешифруванням інтегральних чорно-білих, рідше спектрозональних та радіолокаційних знімків, і мало підпорядковане значення.

З розвитком в останні роки знімальної апаратури, а також впровадженням нових технологій обробки аерокосмічної інформації вприту наблизило дистанційне зондування до вирішення завдань прямих пошуків корисних копалин [8].

Одним із таких методів, що активно розвивається у Центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України (ЦАКДЗ ІГН НАН України), є метод, який базується на вивченні змін оптичних характеристик рослинності і фіксації їх на матеріалах ДЗЗ. Впровадження цих розробок у нафтогазопошукові та геоекологічні дослідження вже дало позитивні результати [5, 7].

Застосування цього методу у рудній геології базується на таких передумовах:

1. Руди кольорових металів, до складу яких відносяться мідь, свинець, цинк, нікель та сурма [2] містять найбільш небезпечні для біосфери метали-мікроелементи, причому найотруйніші для рослинності є Cu, Ni та Pb [5].

2. Завдяки формуванню над покладами кольорових металів геохімічних ореолів розсіювання у грунтовому шарі формуються підвищені концентрації рудоносних мікроелементів, частина з яких у рухомих формах поступає у наземну рослинність, де і накопичується у корінні, деревині, корі та листі [1, 9].

Підвищені концентрації мікроелементів у рослинності впливають певним чином (пригнічення або інтенсифікація процесів життєдіяльності) на їхні біологічні властивості та на хімічний склад. Це явище покладено в основу трудомістких геоботанічного та біогеохімічного методів наземних пошукових робіт.

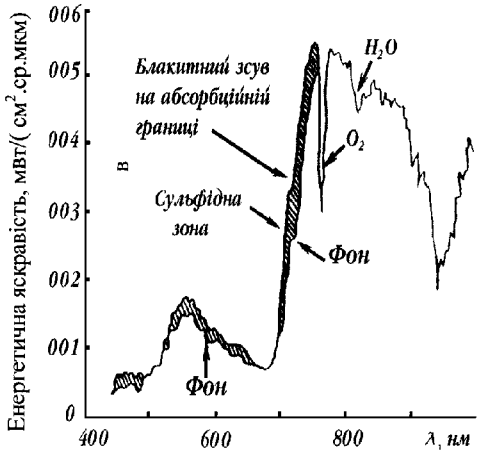
3. При дистанційних дослідженнях на перший план виступає можливість фіксування не стільки морфологічних змін рослинних об'єктів (не кажучи вже про зміни хімічного складу), а змін спектральних характеристик відбитого випромінювання фітоценозів у оптичній та ближній інфрачервоній зонах спектру.

Спектрометричними дослідженнями рослинного стресу, спровокованого підвищеними концентраціями металів (у тому числі Cu, Zn, Pb, Ni), що були виконані з авіаційних носіїв, та у лабораторних умовах виявлено зміщення червоного краю спектру (680—750 мкм) у бік його короткохвильової частини (рисунок).

Розподіл елементів-індикаторів кольорових металів в рослинності (з використанням даних [9])

Елемент	Характер розподілу
Мідь	Найбільший вміст у корінні. У деревині стовбура, гілках та листях вміст однаковий. Також концентрується у стеблах і сухих плодах травостою
Свинець	Накопичується у корінні у найбільшій кількості. У деревині стовбура, гілках та листях вміст близький
Цинк	Найбільший вміст у листях. У корінні та корі вміст більший
Нікель	Накопичується у деревині. Концентрується у листях та стеблах травостою

© В. Є. ФІЛІПОВИЧ, В. Л. ПРИХОДЬКО, Д. О. ТАРАНГУЛ, 2002



Спектральна енергетична яскравість рослинності на грунтах з нормальним та підвищеним вмістом тяжких металів халькофільної групи [11]

Цей ефект дістав назву «блакитного зсуву» і на сучасному етапі вважається універсальним для більшості зелених рослин [5, 10]. При цьому найзначніший стрес за даними лабораторних досліджень навіть у достатньо малих концентраціях (300—500 мг/кг) викликають Cu та Zn; Ni — при малих концентраціях (100—200 мкг/кг) дає невеликий стрес, а у великих — він дуже токсичний, і рослини гинуть. Свинець призводить до незначних змін спектру, а в концентраціях 200—400 мг/кг навіть корисний для рослинності — збільшує біомасу та кількість хлорофілу [5, 10].

Таким чином, «металевий стрес» викликає зміни спектральних властивостей відбитого в області червоного краю випромінювання, а оптичні характеристики у червоній та ближній інфрачервоній областях спектру є безпосередніми носіями дистанційної інформації про стан фітоценозів і, як наслідок, про накопичення рудних елементів у грунтово-рослинному шарі.

На сучасному етапі розвитку фітоіндикації для вирішення пошукових завдань методами ДЗЗ [5, 7, 8] застосовується комплекс, що включає у різних співвідношеннях три види досліджень: наземне спектро- або фотометрування рослинності (польове та лабораторне); спектрометрування з авіаційних носіїв; визначення спектральної яскравості рослинності за даними багатозональної аеро- та космічної фотозйомки високої роздільної здатності.

З розвитком і удосконаленням знімальної апаратури та методів обробки інформації дослідження матеріалів аеро- та космічних зйомок у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах стає більш актуальним.

Для дослідження геологічного середовища, виявлення основних тектонічних елементів, визначення важливих дешифрувальних ознак рудоконтролюючих структур найбільш перспективним серед сучасних методів ДЗЗ є спосіб роздільної фіксації кожної зони спектру, що реалізується як за допомогою аналогових фотографічних, так і цифрових сканерних систем знімання. Так, у фотосистемах він здійснюється за допомогою широко відомих по використанню на ШСЗ серії «Ресурс-Ф» камер КАТЕ-200 і МК-4.

Однак такі «багатозональні» зйомки у фотографічному варіанті мають багато недоліків для роботи зі знімками в комп'ютерних системах. Тому останнім часом найбільший інтерес викликають і мають широке застосування космічні цифрові знімальні системи («Spot», «Landsat» та ін.), які дають знімки з роздільною здатністю від 1—2 до 10—30 м. Число каналів (спектральних зон), що знімаються цифровими системами, коливається від 1—3 («Spot») до 7 («Landsat») і навіть до багатьох десятків і декількох сотень (гіперспектральні). Останні практично застосовуються тільки в авіаційному варіанті. Узагальнюючи все вище викладене з позицій реалізації методів, що розглядаються для задач геологічної практики, необхідно підкреслити два основних моменти.

По-перше, застосування аерокосмічних методів ДЗЗ дозволяє зробити істотний внесок у вивчення структур рудних полів на основі спектральних характеристик геологічних об'єктів в різних зонах спектру. Розробити спектральні образи рудних площ і родовищ, які визначаються літологічними особливостями порід, мінеральною формою знаходження в них рудних компонентів, видом і ступенем деформованості порід, характерними асоціаціями навколорудних змін порід і т. п.

По-друге, дані про основні елементи структури рудних полів і родовищ дозволяють виявити типові спектрально-геометричні образи локальних рудоносних площ, характерних для того чи іншого рудного району. Разом з цим слід відмітити, що на стадії ще відносно низького рівня розробки прогнозних критеріїв всі типи віддешифрованих структурних елементів необхідно вивчати у процесі пошукових робіт. Як показує досвід, тут може бути отриманий фактичний матеріал, який дозволить по-новому трактувати структурні умови рудоутворень і ставити питання про нові методичні способи проведення пошуків кольорових металів.

Серед кольорових металів за рівнем використання найважливіше місце займає мідь. Потреби економіки України в ній величезні і за даними Програми розвитку кольорової металургії України у 2000 р. становили 145 тис. т на рік, а у 2010 очікуються до 175 тис. т [3].

Нині в Україні немає розвіданих родовищ міді. Найперспективнішими вважаються зруднення са-

мородної міді у базальтах трапової формації Волині, де роботами Північного державного регіонального геологічного підприємства (ПДРГП) «Північгеологія» виявлено Волинський міднорудний район площею до 10 тис. км^2. Прогнозні ресурси оцінюються в 25 млн т міді, а в окремих рудних вузлах — від 2 до 6 млн т [3, 4].

З 1997 р. ПДРГП «Північгеологія» розпочаті цілеспрямовані пошуки біляповерхневих покладів міді в межах Рафалівського рудного вузла, де зруднення встановлено від поверхні до глибини 150—250 м, а в Рафалівському кар'єрі був знайдений найбільший самородок міді вагою понад 700 г [3].

Методично пошуки ведуться на основі комплексу геофізичних методів та бурінням. Геофізичними методами картографуються рудовміщуючі товщі трапової формації, які в залежності від складу фіксуються аномаліями магнітного та гравітаційного полів різного знаку та морфології.

Структури, що служили каналами і осередками виверження тріщиного та центрального типів, відзначаються у фізичних полях позитивними магнітними і гравітаційними аномаліями, верхня крайка яких розміщується на рівні поверхні кристалічного фундаменту. Аномалії мають кільцеву, овально-зональну морфологію з радіальним розташуванням тектонічних порушень, отже, характеризуються цілком визначеними ознаками вулкано-плутогенних структур.

Основним наземним геофізичним методом, що застосовується при пошукових і пошуково-оцінювальних роботах на самородну мідь, є електророзвідувальний метод викликаної поляризації (ВП) у модифікаціях зондування, профілювання, «зарядженого» тіла. В основі застосування методу ВП лежить досить складна залежність поляризації середовища від кількісного вмісту в ній самородної міді, що вивчена лабораторними методами на основі колекції рудовміщуючих порід. Ця залежність наближається до прямої при вмісті міді 0.8—1.0 % і вище. При вмісті міді в зразках від 0.3 до 0.8 % використовуються особливості частотних чи тимчасових характеристик спаду процесу ВП.

Використання методу ВП дозволяє картографувати аномалії підвищеної поляризації, аномалії швидкості спаду їхніх частотних характеристик у плані, розрізі й білясвердловинному просторі, що мають зв'язок із самородномідним зруденінням. Застосування методу ВП при пошукових роботах, виконаних у межах Рафалівського рудного вузла, дозволило підняти ефективність геолого-розвідувальних робіт з 22 % до 47 % при класі вмісту міді в підсічених інтервалах понад 0.1 %.

З другої половини 2001 року з метою підвищення ефективності пошуково-розвідувальних робіт ЦАКДЗ ІГН НАНУ розпочато дослідно-методичні роботи з комплексної інтерпретації матеріалів аерокосмічних та геолого-геофізичних зйомок.

На першому етапі, на основі структурно-тектонічного дешифрування матеріалів ДЗЗ та аналізу даних геолого-геофізичних досліджень, побудована регіональна геодинамічна модель, в основу якої покладена розломно-блокова тектоніка та радіально-концентрична система розломів вулкано-плутогених структур. Для вирішення задач на детальному рівні пошукових робіт запропоновано, поряд із структурним довивченням, застосувати дослідження оптичних характеристик рослинності і відображення останніх на матеріалах ДЗЗ. Перспективи цього напряму підтверджуються наземними геохімічними дослідженнями, виконаними співробітниками ПДРГП «Північгеологія» у 2001 році. Так, над виходами рудовміщуючих порід, що вклинюються у приповерхневі горизонти, виявлені аномалії концентрацій міді у водних витяжках з підгрунтя. Це дозволяє зробити висновок про її вертикальну міграцію до грунтово-рослинного шару і, таким чином, очікувати накопичення міді та її сполук у рослинному покриві. З другого боку, Рафалівська площа характеризується наявністю великих масивів соснових та змішаних лісів, серед яких переважають сосна, береза, дуб, ялина. Останні відносяться до стійких рослин — фітоіндикаторів [5, 7, 11]. Зауважимо, що уперше явище «блакитного» зсуву у інтервалі довжин хвиль 710—740 нм було виявлено Коллінзом та іншими [11] саме у спектрах відбитого випромінювання хвойних дерев (переважно сосна, ялина), які розміщені на породах з підвищеними концентраціями халькофільних елементів (рисунок).

Досвід, накопичений у ЦАКДЗ, при розробці запропонованого методу [5—7], дозволяє сформувати комплекс необхідних прийомів:

1. Ландшафтне районування з детальним вивченням грунтово-рослинного покриву за матеріалами ДЗЗ та наземними спостереженнями.

2. Виділення тестових ділянок (родовище, фон).

3. Багатоканальна аероспектрометрична зйомка та спеціалізована попередня обробка даних.

4. Наземне фотометрування рослинності (польове і лабораторне) та попередня обробка даних.

5. Вивчення матеріалів багатозональної космічної зйомки переважно у області червоного краю та виявлення оптичних аномалій.

6. Аналіз результатів досліджень, внесення необхідних коригувань, виділення перспективних на руди ділянок.

Зауважимо, що у сучасних економічних умовах, використання аероспектрометрії у повному об'ємі досить проблематичне. У зв'язку з цим більший обсяг досліджень повинен припадати на аналіз

мультиспектральної цифрової супутникової інформації, насамперед, з високою спектрометричною роздільною здатністю.

При комплексуванні дистанційних та традиційних геологічних методів при пошуках кольорових металів, на наш погляд, доцільно розрізняти роль ДЗЗ на регіональному рівні (масштаб досліджень 1:200 000 — 1:100 000) та етапах детальних робіт (М 1:50 000 — 1:10 000).

На регіональному рівні приріст геологічної інформації відбувається завдяки структурно — тектонічному дешифруванню переважно матеріалів середньої й високої роздільної здатності (перші сотні й десятки метрів). Завдяки генералізації та охопленню значних територій матеріали ДЗЗ дозволяють підвищити якість інтерпретації даних геофізичних робіт, які по суті є методами точково-профільних досліджень.

На етапах детальних робіт разом з довивченням структури пошукових ділянок у комплексі з геофізичними методами, важливе значення набуває аналіз та інтерпретація матеріалів інтегральної та багатозональної зйомки з високою роздільною здатністю (від 1 до 10 м). У комплексі з геохімічними методами та бурінням ці матеріали, на основі вивчення змін оптичних характеристик спектру відбитого випромінювання та текстури зображення, можуть застосовуватися при локалізації ділянок із рудовміщуючими породами, а в окремих випадках виступати і як прямі ознаки руд кольорових металів.

Відносно малі затрати на отримання даних ДЗЗ (150—200 тис. грн на рік, де 50—60 % вартості припадає на цифрову супутникову інформацію з зарубіжних носіїв) у порівнянні з загальною вартістю пошукових робіт, навіть на таких невеликих ділянках, як Рафалівська (за попередніми геолого-геофізичними даними першочергова площа пошукових робіт становить 32 км^2, а загальна вартість оцінюється в 5 млн грн [3]) дозволять не тільки підвищити геологічну, а й економічну ефективність комплексу геолого-розвідувальних робіт.

Таким чином, комплексування дистанційних та традиційних геологічних методів при дослідженні структур рудних районів і полів дозволяє більш ефективно вивчати важливі, як в теоретичному, так і в практичному відношенні закономірності розміщення зруденіння.

1. Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981.—320 с.
2. Горная энциклопедия. В 5 т. / М.: Советская энциклопедия, 1989.—т. 4. 415 с.
3. Гурський Д. С., Калінін В. І., Пижук І. П. та інші. Стан мінерально-сировинної бази кольорових металів України // Мінеральні ресурси України.—2000.—№ 4.—С. 2—4.
4. Гурський Д. С., Приходько В. Л., Білоус В. В. Самородна мідь Волині // Мінеральні ресурси України.—1995.—№ 1.—С. 6.
5. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Жарый В. Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. — К.: Наук. думка, 1992.—206 с.
6. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Котляр А. Л. Ландшафтная классификация и оценка фитометрических параметров растительного покрова с использованием многозональных снимков в оптическом диапазоне сканера МСУ-В КА «Океан-О» // Матеріали третьої Української наради користувачів аерокосмічної інформації (20-24 листопада 2000 р., м. Київ. — К.: Знання України, 2001.—С. 77—85.
7. Лялько В. І., Федоровський О. Д., Перерва В. М. та ін. Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. Методичний посібник по тематичній інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок. — К.: 1999.—264 с.
8. Перерва В. М., Лялько В. И., Архипов А. И. и др. Прямой поиск залежей нефти и газа дистанционными методами (предварительный опыт, перспективы развития). — К.: 1995. — 83 с. (Препринт / НАН Украины. ИГН; 95-95)
9. Поликарпочкин В. В., Поликарпочкина Р. Г., Биогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. М.: Наука, 1964. — 98 с.
10. Chang S. H., Collins W. Confirmation of the Airborne Biogeophysical Mineral Exploration Technique Using Laboratory Metods // Econ. Geol. —1983.—N 78(4).—P. 723—736.
11. Collins W., Chang S. H., Raines G., et al. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits // Econ. Geol.—1983.—N 78(4).—P. 737—749.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 174—180

Геофлюидодинамические структуры литосферы и их изучение дистанционными методами

В. М. Перерва

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

АКТУАЛЬНОСТЬ ВОПРОСА

В последние годы обоснованно возрос интерес к флюидодинамическим процессам и структурам, в пределах которых развиваются эти процессы [1—20]. Возросшее внимание к указанным структурам и процессам обусловлено их более высокой значимостью, чем это считалось ранее, в общем цикле литосферных процессов, в определении структуры литосферы, а также изучении многих как теоретических вопросов геологической науки, так и решении практических задач, главными из которых, пожалуй, следует считать проблемы формирования и размещения месторождений полезных ископаемых, их поиска, разведки и разработки. Своеобразным информационным импульсом возросшего внимания к флюидодинамическим процессам, масштабам их проявления в литосфере послужили данные бурения сверхглубоких скважин, показавшие наличие зон разуплотнения как флюидонесущих структур на глубинах более 10—12 км (Кольская сверхглубокая № 1). Последующее изучение расширило представления о процессах вертикальной миграции пластовых и глубинных как жидких, так и газообразных флюидов, играющих в ряде случаев главенствующую роль в формировании месторождений полезных ископаемых, а также в одном из главнейших вопросов геологической науки — генезисе углеводородов, участие в котором глубинных флюидов все более занимает умы исследователей [4, 7—9, 14, 16]. Флюидодинамические процессы являются одними из наиважнейших во взаимодействии атмосферы, гидросферы и литосферы, и составляют основу физико-химических изменений, которые развиваются на границе их раздела.

В учении о флюидодинамических процессах одним из основных вопросов является модель флюидопроводящих структур, их морфогенетические характеристики. К числу флюидопроводящих структур по современным представлениям бесспорно относят линейные образования литосферы (разломные зоны), которые на раннем этапе изучения признавались, пожалуй, единственным, с которыми связывались флюидодинамические процессы. Последующее изучение показало, что роль флюидопроводящих структур не в меньшей степени играют структурные образования в теле литосферы, имеющие в плане форму кольца или многоугольника. Их обнаружение и наиболее полное изучение связывается с космическими методами, дающими высокоинформационный эффект генерализации картины ландшафтных процессов, обусловленных в своем развитии геологическими явлениями и структурами. Преимущественно аэрокосмические методы послужили информационной основой создания модели геофлюидодинамических структур на основе обобщения большого объема данных по многим регионам (Волго-Уральская, Днепровско-Припятская, Западно-Сибирская нефтегазоносные провинции, Северо-Западный Кавказ, Азовское и Северо-Западный шельф Черного морей и некоторые другие).

ОСНОВНЫЕ МОРФОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР

На основе аэрокосмогеологических исследований, выполняемых в Центре аэрокосмических исследований Земли с 1988 г., модель флюидопроводящих структур, названных нами геофлюидодинамическими структурами литосферы (ГФДС) [14, 15], представляется следующим образом. ГФДС формируется в узлах пересечения вертикальных зон напряженно-деформированного состояния литосферы (ВЗНДС). Напряженно-деформированное состояние литосферы в этих зонах характеризуется в ряде случаев проявлением разноамплитудных разрывных нарушений, знакопеременных геодинамических напряжений сжатия-растяжения, нарушения скелета породы, формирования новейшей трещиноватости. В фазе растяжения за счет увеличения межзернового пространства формируются флюидопроводящие вертикальные каналы, природные

© В. М. ПЕРЕРВА, 2002

резервуары различного типа, заполняемые в благоприятных условиях нефтью (нефтегазоносные провинции), продуктами деятельности гидротермальных растворов (различные руды). Однако следует подчеркнуть, что проявление высокоамплитудных разрывных деформаций для этих зон не является обязательным атрибутом, в большинстве случаев сейсморазведочные работы не фиксируют в них проявлений разрывных деформаций. Следовательно, если они и проявляются, то их амплитуда находится за пределами разрешающей способности сейсмических методов (в среднем менее 20 м).

Чтобы познать наиболее важные признаки ВЗНДС, рассмотрим проекцию на земную поверхность этих зон (след на земной поверхности), которая очень уверенно изучается дистанционными методами и которые являются, пожалуй, единственными методами их изучения. На материалах аэрокосмических исследований эта проекция прослеживается в виде разновеликих линий или зон, называемых, как это принято в практике аэрокосмогеологических исследований, линеаментами. Самые важные свойства ВЗНДС отчетливо прослеживаются по характерным признакам линеаментов. Наиболее полно эти признаки рассматриваются в работе [12]. В этой работе лишь укажем на эти признаки: прямолинейность, прослеживаемая на больших расстояниях (более 10000 км) и выдерживающаяся вне зависимости от типа ландшафтных и тектонических зон, что является следствием вертикального положения ВЗНДС в теле литосферы; высокая протяженность линеаментов низшего ранга, имеющих трансконтинентальный характер, вероятно, связана с их опоясывающим планету характером. Этот признак очень важен, т.к. свидетельствует о том, что каждая ВЗНДС, следом которой является такой линеамент, поражает земную сферу по всей окружности. При этом следует подчеркнуть, что глубина проникновения ВЗНДС низкого ранга, как наиболее масштабных образований, является вопросом слабо изученным. По нашим представлениям, базирующимся на некоторых данных, глубина их проникновения ограничивается подошвой мантии.

Третий признак определяется отсутствием связи линеаментов с основными тектоническими зонами; низкоранговые линеаменты прослеживаются в пределах континентов, уходя в область развития коры промежуточного и океанического типов.

Четвертый признак — плотность линеаментов, составляющая около 0.15—0.20 км/км^2 для наиболее крупных линеаментов, выдерживается вне зависимости от ландшафтной и тектонической принадлежности территории. Плотность линеаментов более высоких порядков возрастает, но она также остается постоянной.

Закономерный характер размещения линеаментов является пятым признаком и заключается он в периодическом чередовании линеаментов одного ранга и простирания. Период чередования или расстояния между одноранговыми линеаментами остается постоянным вне зависимости от тектонической принадлежности территорий. Расстояния между разноранговыми линеаментами различны и составляют от 300 до 400 м для высокоранговых и до 100—180 км для низкоранговых линеаментов. Указанная периодичность, вероятно, связана с волновым характером поля напряжений, формирующих ВЗНДС.

Шестой признак связан с периодической повторяемостью смены азимутов простирания линеаментов. Этот признак отмечался в более ранних работах, посвященных изучению разрывных структур [15, 18]. В среднем величина смены азимута простирания по нашим данным составляет 15°. При этом отмечается парный характер развития линеаментов, угол между направлениями которых достигает 90°. Это позволяет выделить следующие пары линеаментов: 0—90°, 15—105°, 30—120°, 45—135° и т. д.

Указанные свойства ВЗНДС (линеаментов) связываются с воздействием на Землю космогенных факторов [1—3, 15, 18], что и определяет планетарный характер формирования и развития указанных признаков. Большинство исследователей связывает формирование этих признаков с изменением ротационного режима Земли (положения оси вращения и угловой скорости) вследствие ее взаимодействия с окружающими космогенными физическими полями, что приводит к формированию новой фигуры равновесия планеты. Изменение скорости вращения Земли подвержено годовым и сезонным вариациям. Сезонная неравномерность угловой скорости вращения Земли обусловливает сезонные изменения тангенциальных напряжений и деформаций. Годовая неравномерность скорости вращения осложняется непрерывными ее флуктуациями и гравитационными возмущениями приливной природы.

Среди других факторов называются воздействие на Землю физических полей в период нахождения Солнечной системы в струйных потоках Галактики, а также возникновение в экстремальных точках орбиты Солнечной системы (перигалактии и апогалактии) во внешней оболочке Земного шара разноплановых тектонических деформаций, обусловленных его полярным сжатием и растяжением. Полярное сжатие и растяжение возникает также при изменении ротационного режима Земли, приводящее к изменениям центробежных и центростремительных сил. Полярное сжатие и растяжение Земли, вероятно, играют одну из основных ролей в

формировании горизонтальных зон разуплотнения, установленных во многих регионах и заполненных жидкими и газообразными флюидами, в том числе и углеводородами, рассолами. За счет полярного сжатия и растяжения, по нашему мнению, формируются ВЗНДС широтного простирания. Другие ВЗНДС (меридиональные и диагональные) своим формированием, вероятно, обязаны более широкому спектру факторов космогенного воздействия.

Планетарный характер развития ВЗНДС и их различные простирания приводят к их взаимному пересечению. В узлах такого пересечения формируются вертикальные (или субвертикальные) образования — ГФДС. Основным и важнейшим признаком ГФДС является их аномальная флюидопроводимость, обусловленная процессами разуплотнения пород. Вертикальный характер заложения ГФДС уверенно прослеживается по приуроченным к ним глиняным и соляным диапирам. Так, по данным сейсморазведочных работ соляные диапиры Днепровско-Донецкой впадины имеют в большинстве своем вертикальный характер (рис. 1). При этом соляные диапиры подчеркивают не только вертикальность ГФДС, но и характер их плановых очертаний. На материалах космических съемок ГФДС имеют изометричные (кольцеобразную или форму многоугольника) очертания, что также характерно для соляных и глиняных диапиров.

Размеры ГФДС зависят от иерархии формирующих их ВЗНДС и варьируют от 1 до 200 км (возможно и более). Как понятно, ГФДС также имеют иерархический ряд, что находит свое выражение в указанной вариации их размерности. Структура ГФДС имеет ярко выраженный гетерогенный характер, заключающийся в чередовании участков низкой и высокой проницаемости. Последние, как элементарные образования в структуре ГФДС, названы нами очагами разуплотнения. Их размеры в поперечнике составляют 300—400 м. При этом не исключается, что при использовании материалов космических съемок, выполненных съемочными устройствами более высокого пространственного разрешения (лучше чем 30 м), могут быть обнаружены очаги разуплотнения мелких размеров (не более 2—3 м в поперечнике). Собственно, биолокация как метод изучения очагов на локальном уровне, называемых нередко геопатогенными зонами, имеет именно эти результаты. На уровне биолокации эти образования получили названия сеток Витмана, Хартмана и Курри [21]. Указанные сетки, по сути, являются проявлением на локальном уровне рассмотренной выше планетарной системы зон напряженно-деформированного состояния литосферы и находящиеся с ней в иерархической зависимости. При этом иерархический уровень элементов планетарной системы определяет масштабность протекающих в них процессов. Например, если в узлах сеток Витмана, Хартмана и Курри формируются геопатогенные узлы (зоны) локального (бытового) уровня, то в узлах крупной сети — месторождения полезных ископаемых, соляные и глиняные диапиры и другие геологические явления и структуры.

СВЯЗЬ СОВРЕМЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ С ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ ЛИТОСФЕРЫ КАК ОСНОВА ИХ ИЗУЧЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Проявление в ландшафте ГФДС обусловлено основными их признаками: разуплотнением поверхностных отложений, высокой степенью их флюидопроницаемости и более интенсивным проникновением поверхностных вод, аномальным характером геофизических, геохимических и биохимических полей. Эти признаки определяют аномальный характер развития экзогенных процессов в зоне развития рассматриваемых структур литосферы [15]. Поверхностный сток в пределах ГФДС в большей своей части переходит в инфильтрацию поверхностных вод, что обуславливает развитие суффозионных процессов при наличии благоприятных литологических и геоморфологических условий (величина уклона местности, например). В наиболее благоприятных для развития этих процессов условиях (высокая степень разуплотнения пород, литология поверхностных отложений) формируются не только микро-, но и макроформы рельефа. В пределах ГФДС вертикальная миграция пластовых и глубинных как жидких, так и газообразных флюидов усиливает эффект ландшафтного выражения этих структур. Одним из наиболее ярких и широко распространенных признаков воздействия на ландшафты ГФДС являются аномальные изменения оптических характеристик компонентов ландшафта. Собственно этот признак лежит в основе формирования большинства геоиндикационных признаков ландшафтов и изучения ГФДС дистанционными методами. Наземное и дистанционное изучение оптических характеристик не только растительности, но и в целом ландшафтов открывает большие возможности в эффективном изучении многих процессов, как визуально не фиксируемых, но имеющих важное научное и практическое значение, так и ярко выраженных в их начальной (скрытой) фазе развития, формирующие, например, разломные зоны, овражно-балочные системы, карст, оползни и другие структурно-тектонические и ландшафтные формы. Создавая оптические ландшафтные модели можно более эффективно решать многие геологические (поиски месторождений по-

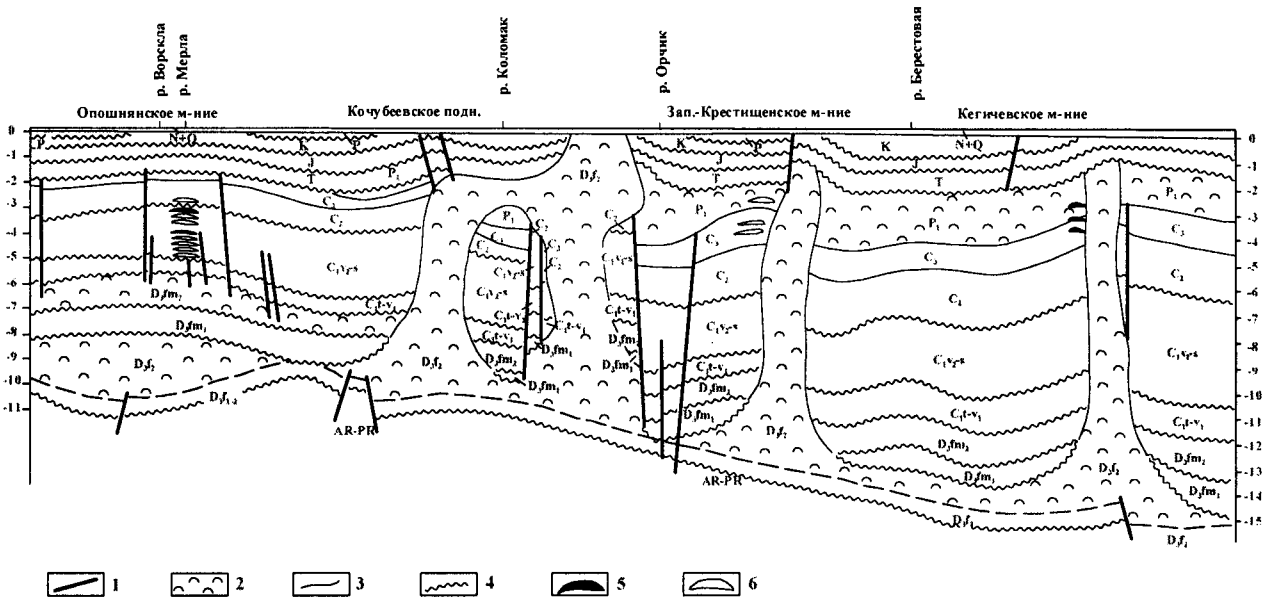


Рис. 1. Геологический разрез вдоль линии: месторождение Опошнянское, Зап. Крестищенское, Кегичевское (Днепровско-Донецкая впадина). Условные обозначения: 1 — разрывные нарушения, 2 — соль, 3 — геологические границы, 4 — границы несогласного залегания пород; залежи: 5 — нефтяные, 6 — газовые; N+Q — неоген-четвертичные отложения, р — палеоген, К — мел, J — юра, Т - триас, C_3 — верхний карбон, C_2 — средний карбон, P — нижняя пермь, нижний карбон: C_1v_2-s — верхневизейский подъярус и серпуховский ярус, C_1t-v_1 — турнейский ярус и нижневизейский подъярус, верхний девон: D_3fm_2 — верхнефаменский подъярус, D_3fm_1 — нижнефаменский подъярус, D_3fm_1 — верхнефранский подъярус; евлановский и ливенский горизонты, D_3f_{1-2} — франский ярус, пашийско-воронежский горизонт, $AR+PR_1$ — архей—нижний протерозой

лезных ископаемых), инженерно-геологические (строительство крупных промышленных объектов: АЭС, гидросооружения), экологические (изучение зон загрязнения радионуклидами, химическими токсикантами) и другие задачи. Причем решать эти задачи в мониторинговом режиме [13].

В современном рельефе ГФДС выражаются в разной гипсометрической и морфологической его дифференциации, выражающейся в сочетании разноориентированных микровозвышенностей и микровпадин. С ГФДС связано формирование таких образований, как поды и степные блюдца. В некоторых регионах с ГФДС связано формирование большинства озер (Западная Сибирь, северная часть Украины, Белоруссия и некоторые другие). Вертикальная миграция пластовых и глубинных газообразных флюидов в зоне ГФДС оказывает угнетающее влияние на развитие микрофлоры и микрофауны этих водоемов, что находит свое выражение в более высокой степени прозрачности вод.

Контролирующее влияние процессов, развивающихся в пределах ГФДС, в рельефе морского дна и прибрежной зоны выражается в формировании песчаных банок, кос, развитии оползневых явлений, характерных очертаний бухт. Механизм формирования песчаных банок и кос обусловлен влиянием геофизических полей и вертикальной миграцией глубинных и пластовых газов, обуславливающих аномальное осаждение обломочного материала в зоне ГФДС (снижение плотности вод и эффекта плавучести за счет насыщения вод газами). В пределах Черного и Азовского морей в зоне ГФДС береговая линия приобретает дугообразную форму, оконтуривая часть ГФДС, расположенную в пределах суши (заливы Одесский, Егорлыцкий, Каламитский, Феодосийский, Казантипский, Темрюкский и другие). К зоне ГФДС приурочена дельта Дуная. Это определяет многочисленность озер, форму и ориентировку их длинных осей. Дельта расположена в узле пересечения широких разломных зон широтного, меридионального и диагонального простирания.

ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Связь месторождений полезных ископаемых с ГФДС ныне признается многими исследователями, хотя во многих работах ГФДС описываются как кольцевые структуры, давая им название по форме эрозионного среза [4—11, 16, 18, 19]. ГФДС выступают в роли фактора формирования и определе-

ния закономерностей размещения месторождений многих полезных ископаемых (промышленных скоплений углеводородов, различных руд, алмазов, термальных, минеральных и питьевых вод и других). Пожалуй, наиболее полно изучена связь с ГФДС промышленных скоплений углеводородов и месторождений некоторых руд [4—7, 10, 11, 16]. Связь месторождений нефти и газа с ГФДС отчетливо прослеживается в Азово-Черноморском регионе, в пределах которого практически все известные ныне скопления углеводородов локализуются в зоне влияния ГФДС. Это свидетельствует о вторичной природе этих месторождений, формировании их за счет вертикальной миграции углеводородов по зоне ГФДС (Голицинское, Шмидта, Архангельское, Штормовое, Джанкойское, Морское и другие). Весьма показательно, что эта связь, используемая в качестве нефтегазопоискового критерия, подтверждена на стадии поиска залежей углеводородов. В пределах зоны влияния двух ГФДС, выявленных аэрокосмическими исследованиями ЦАКИЗ в 1996 г. в Азовском море, впоследствии открыты Северо-Казантипское и Восточно-Казантипское газоконденсатные месторождения.

Связь рудных месторождений с ГФДС установлена по ряду регионов Дальнего Востока, Урала, Средней Азии. В Украине эта связь прослеживается уверенно в пределах Луковско-Ратновской горстовой зоны, Коростенского и Днепровского тектонических блоков (рис. 2). Имеющиеся данные свидетельствуют о большой роли ГФДС в формировании месторождений конкретных генетических типов в пределах структурно-металлогенических зон. Это указывает на необходимость создания единой научной основы изучения флюидодинамических процессов, морфогенетических признаков ГФДС, их роли в эволюции литосферы, формировании и размещении месторождений полезных ископаемых.

Движение пластовых и глубинных флюидов (в том числе магматических расплавов) связано с изменением давлений как в самой ГФДС, так и в смежных с нею зонах. Как показывают данные инструментальных наблюдений в зонах ГФДС поле напряженно-деформированного состояния литосферы характеризуется мигрирующими и взаимно пересекающимися волнами сжатия-растяжения. Мигрирующие волны распространяются как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Природа их разнообразна, что определяет разную величину периода каждого типа волн (суточные, годовые, вековые и большие периоды). Мигрирующие в вертикальной плоскости волны растяжения обусловливают вертикальную миграцию флюидов и имеют таким образом характер флюидонесущих. Проникновение мигрирующего флюида в смежные с ГФДС природные резервуары определяется соотношением в них давлений. Сформированные ГФДС понижают в литосфере качества флюидоупора и способствуют внедрению по ним, как ослабленным зонам, мантийного вещества. Мантийный флюид в силу изменения термобарических условий на пути вертикальной миграции не сохраняется как единая система и распадается на ряд компонентов твердой, жидкой и газообразной фаз. Этот процесс обусловливает формирование месторождений, различных морфогенетических типов и видов минерального сырья.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ, НАУЧНОГО И ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЧЕНИЯ О ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ЛИТОСФЕРЫ

Одним из главнейших направлений дальнейшего развития учения о ГФДС является расширение масштабов исследований от регионального до общепланетарного уровней, что позволит познать роль вертикальных зон напряженно-деформированного состояния литосферы и образуемых ими ГФДС в общем цикле планетарных геологических явлений и в структуре планеты. Так, предварительные исследования показывают, что формирование трансформных разломов и самих зон спрединга связано с вертикальными зонами напряженно-деформированного состояния литосферы. При этом подмечено, что в простирании зон спрединга и трансформных разломов фиксируется тот же признак парности, что и для ВЗНДС регионального уровня. Напомним, что характерным признаком парных ВЗНДС является угол их пересечения, равный 90°. На планетарном уровне более ярко, чем на региональном прослеживается контролирующая роль ВЗНДС в определении границ материков, океанических впадин, хребтов, желобов и в целом литосферных плит. Так, с серией сближенных меридиональных ВЗНДС связаны (с севера на юг) долина р. Днепр (район Канева, Киева и несколько севернее), береговая полоса Черного моря (район устья р. Дунай и южнее), долина р. Нил, размещение Великих африканских озер (Танганьика, Виктория, Рудольф, Киву и другие), участок восточной береговой полосы Африканского континента и далее в пределах океана — котловины мыса Игольного, Африканско-Антарктической котловины, а также трансформные разломы этого района. С серией ВЗНДС широтного простирания связаны (в направлении с запада на восток) вулканы Южной Америки (Руис, Котопахи), Африки (Камерун, Карисимби, Кения, Килиманджаро), Больших Зондских островов и Маланезии (Марапа, Кракатау, Сламет, Раунг, Ламингтон).

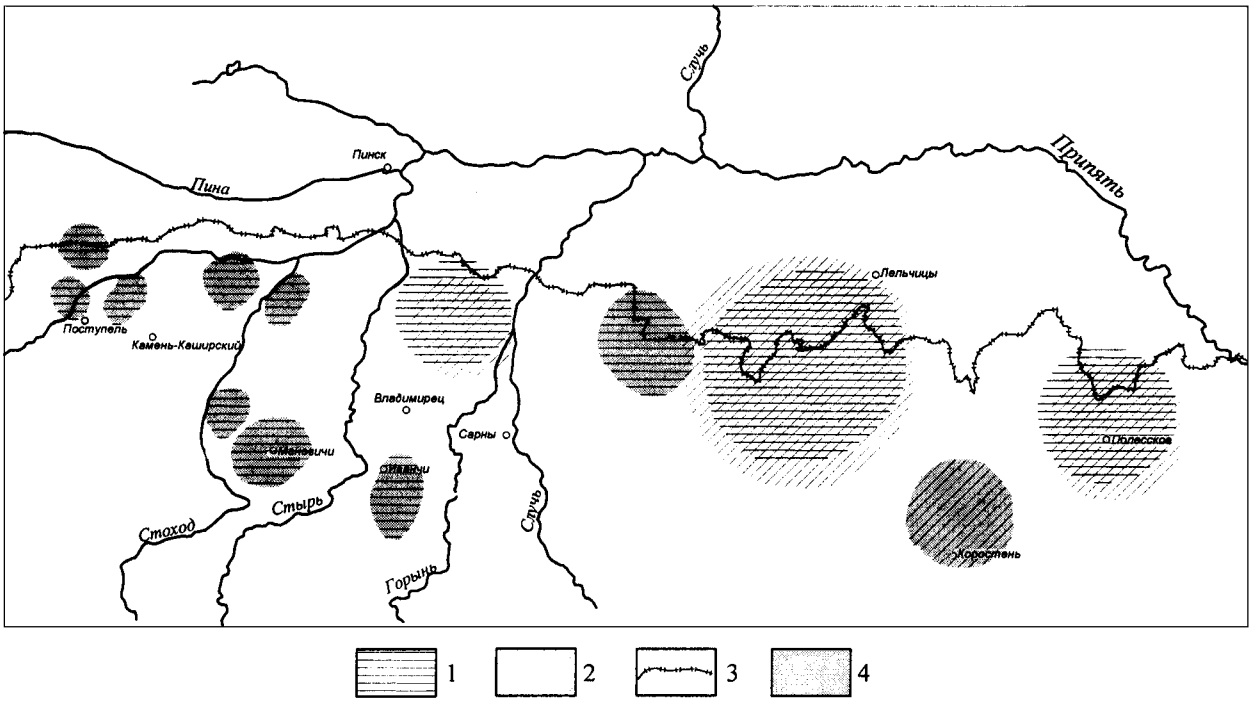


Рис. 2. Схема размещения полей ландшафтного выражения геофлюидодинамических структур (ГФДС) и рудного узла в пределах Луковско-Ратновской горстовой зоны. Условные обозначения: 1 — поле ландшафтного выражения ГФДС; 2 — рудные узлы; 3 — государственная граница Украины и Белоруссии; 4 — объект не изучен детальными работами (геологоразведочными, аэрокосмическими)

Перспективы развития прикладного направления учения о ГФДС связывается с дальнейшим изучением их роли в формировании и размещении месторождений полезных ископаемых, позволяющим оптимизировать процессы их поиска, разведки и разработки. Ныне учение о ГФДС составляет основу спутниковой технологии прогноза залежей УВ и изучения зон разуплотнения, благоприятных для формирования вторичных коллекторов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами. Углубление учения о ГФДС позволит совершенствовать указанные спутниковые технологии.

Ближайшими задачами прикладного направления является изучение связи с ГФДС месторождений рудных полезных ископаемых, алмазов, термальных вод и использование этой связи в качестве поискового критерия.

Кратко изложенные в данной статье основные сведения о модели ГФДС свидетельствуют о важной их роли в строении литосферы и протекающих в ней процессах, как на локальном, так и на планетарном уровне, формировании и размещении месторождений полезных ископаемых, что определяет научное и практическое значение развития учения о ГФДС.

1. Баренбаум А. А. Роль космогенного фактора в геодинамике // Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные). — М.: ИГиРГИ, 1994.—С. 13.
2. Белов Н. И. О природе горизонтальных напряжений и влиянии космических факторов на реализацию горных ударов и землетрясений // Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные). — М.: ИГиРГИ, 1994.—С. 17—18
3. Буш В. А. Система трансконтинентальных разломов Евразии // Геотектоника.—1983.—№ 3.—С. 15—31.
4. Богацкий В. В. Механизм формирования структур рудных полей. — М.: Недра, 1986.—88 с.
5. Каримов В. Ю., Рачинский Л. И. Геофлюидодинамические аспекты формирования и прогноза нефтегазоносности // Сов. геология.—1990.—№ 1.—С. 19—26.
6. Мурадян В. М., Ледовская Г. И. Генетическая взаимосвязь крупных скоплений углеводородов с зонами разрядки геодинамической напряженности // Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные): Тез. докл. Первого Междунар. семинара. — М.: ИГиРГИ, 1994.—С. 115—116.
7. Морфоструктурные исследования: теория и практика / Г. И. Худяков, А. П. Кулаков и др. — М.: Наука, 1985.—212 с.
8. Открытие от 24.07.80, № 234. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцеобразных геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле земной коры / Зорькин Л. М., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. и др.).
9. Перерва В. М. Аномалии температур морской поверхности Черного моря как геоиндикаторы структуры земной коры и скоплений углеводородов // Геол. журн.—1993.—

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 180—186

№ 6.—С. 46—52.
10. Перерва В. М. Геофлюїдодинамічні основи супутниковвих технологій пошуку промислових скупчень вуглеводнів // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — К., 1999.—С. 165—194.
11. Перерва В. М. Флюїдопровідні структури літосфери та їх роль у формуванні родовищ корисних копалин // Мінеральні ресурси України».—1997.—№ 1-2.—С. 24—30.
12. Перерва В. М. Стан проблеми прогнозу покладів вуглеводнів і вторинних колекторів на основі супутникових технологій // Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології. — К., 2000.—С. 291—296.
13. Перерва В. М. Геофлюидодинамический аспект геоэкологии // Эниология.—2001.—№ 3.—С. 43—48.
14. Перерва В. М. Вероятная природа линеаментов, выявляемых аэрокосмическими методами backslash // Геол. журн.—1999.—№ 1.—С. 66—76.
15. Перерва В. М. Геофлюидодинамические структуры литосферы и современные ландшафты backslash // Український географ. журн.—2000.—№ 4.—С. 12—18.
16. Перерва В. М., Лялько В. І., Шпак П. Ф. Флюїдопровідні структури і нафтогазоносність Азово-Чорноморського регіону // Доп. НАНУ.—1997.—№ 4.—С. 136—139.
17. Тяпкин К. Ф. Оценка современного состояния геотектонических гипотез // Геофиз. журн.—1995.—№ 1.—С. 24—32;—№ 3.—С. 31—37;—№ 4.—С. 23—31.
18. Флюидодинамический фактор в тектонике и нефтегазоносности осадочных бассейнов. — М.: Наука, 1989.—239 с.
19. Файф У., Прайс И., Томпсон А. Флюиды в земной коре. — М.: Мир, 1981.—436 с.
20. Чебаненко И. И. Теоретические аспекты тектонической делимости земной коры (на примере Украины). — Киев: Наук. думка, 1977.—84 с.
21. Швебс Г. И. Введение в эниогеографию. Кн. 1. Эниоземлеведение. — Одесса: Изд-во Одесского ун-та, 2000.—253 с.

Флюїдодинамічні і неотектонічні основи та попередні результати апробації супутникової технології вивчення геологічної будови та перспектив нафтогазоносності шельфу

О. Ю. Котляр, З. М. Товстюк, В. М. Перерва, Т. А. Єфіменко, О. В. Седлерова, В. І. Шульга

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук України, Київ

Розробка наукових основ супутникової технології прогнозу покладів вуглеводнів у межах морських акваторій України була вперше розпочата в 1991 році і продовжується нині у відділі аерокосмічних досліджень з геології Центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України. На момент постановки задачі розробки теоретичних основ взаємозв'язку ландшафтів морського дна та морської поверхні з нафтогазогеологічними процесам і структурами досвіду вітчизняних та зарубіжних дослідників в цьому питанні було замало, що ускладнювало рішення задачі.

Важливо при цьому підкреслити, що для нафтогазоносних провінцій і областей морських акваторій задача виявлення геоіндикаційних ознак морської поверхні та морських ландшафтів є досить складною.

Розробка технології пошуку покладів вуглеводнів (ВВ) на шельфі проводиться в умовах Азовського та Північно-Західного шельфу Чорного морів. При виявленні зон, перспективних на нафту і газ в Азово-Чорноморському регіоні, були визначені основи методики робіт, яка включає два компоненти: вивчення геофлюїдодинамічних процесів та їх проявів; дослідження неотектонічних рухів і процесів.

Геолого-геофізична модель нафтогазоносних територій Азовського та Північно-Західного шельфу Чорного морів базується на сучасних даних про блокову будову гетерогенного фундаменту, яка відбивається у структурі осадового чохла та окремих елементах підводного ландшафту. Для уточнення цієї моделі були використані КЗ із штучних супутників Землі (ШСЗ) серії «Landsat», «Океан-О», NOAA.

На основі супутникової інформації вперше була одержана найбільш повна картина розломно-блокової будови Азово-Черноморського регіону, отримано дані про новітні та сучасні рухи літосфери та розвиток геофлюїдодинамічних структур. На основі супутникової технології в повній мірі вивчаються флюїдопровідні структури літосфери, що дозволяє оптимізувати процес пошуку скупчень вуглеводнів.

По ряду регіонів було встановлено, що вертикальна міграція пластових і глибинних флюїдів

© О. Ю. КОТЛЯР, З. М. ТОВСТЮК, В. М. ПЕРЕРВА, Т. А. ЄФІМЕНКО, О. В. СЕДЛЕРОВА, В. І. ШУЛЬГА, 2002

пов'язана не лише з розривними порушеннями. Досить часто в зонах лінеаментів, що не несуть ознаки розривних порушень, шляхами міграції флюїдів слугують осередки розущільнення порід, що є початковою стадією деструкції літосфери, яка втрачає при цьому властивості флюїдоупору.

Таким чином, під геофлюїдодинамічними структурами (ГФДС) автори розуміють вузли перетину лінійних зон напружено-деформованого стану літосфери. Флюїдопровідність ГФДС є однією з важливих властивостей, що обумовлює їхнє відображення на матеріалах аерокосмозйомок. Мігруючи по них, рідкі та газоподібні пластові та глибинні флюїди, досягаючи морської поверхні, спричиняють аномальні зміни спектральних характеристик компонентів ландшафтів морського дна (рослинності, порід), зміни температурного поля поверхні води і зміни характеристик фізичних полів, що в свою чергу знаходять відображення в аномаліях щільності та структури зображень як у видимому, так і в тепловому діапазонах електромагнітного спектру.

Проведені аерокосмогеологічні дослідження дозволили одержати не тільки просторове положення ГФДС, але й вивчити її гетерогенну будову, яка обумовлена чергуванням ділянок високої і низької флюїдопровідності літосфери. Ділянки високої проникності порід одержали назву осередків розущільнення [1, 2].

Порівняно з суходолом ландшафтне зображення геодинамічних вузлів морського дна на космічних знімках дешифрується значно чіткіше. Це обумовлено відсутністю техногенних факторів, більш сприятливими фізико-хімічними умовами збереження морських ландшафтів, особливості будови яких обумовлені геологічними та геодинамічними умовами розвитку. Вказані обставини дозволяють досить впевнено прослідкувати зв'язок геодинамічних вузлів з лінійними зонами розущільнення в літосфері, або ж з розривними порушеннями, що ускладнюють ці зони.

Дослідженнями було встановлено [2], що всі коси Азовського та Чорного морів розташовуються в межах геодинамічних вузлів та утворюючих їх розломів (Обіточна, Тендрівська). Приуроченість їх до геодинамічних вузлів обумовлена комплексом фізико-хімічних процесів та аномальним характером геофізичних полів. Ці процеси створюють сприятливі умови для акумуляції тут уламкового матеріалу. Вертикальна міграція пластових і глибинних газоподібних флюїдів по субвертикальних флюїдопровідних структурах літосфери викликає пониження щільності морських вод. Саме в цих місцях відбувається акумуляція уламкового матеріалу. Очевидно, таким чином відбувається і утворення піщаних банок. Встановлено, що всі відомі в регіоні промислові скупчення вуглеводнів (ВВ) просторово належать до ГФДС (Голіцинське, Шмідта, Джанкойське, Стрілкове, Приазовське, Північно-Керченське, Сигнальне, Морське, Жовтневе, Прибережне).

Інтерес до неотектонічного етапу розвитку земної кори обумовлений тим, що саме з ним пов'язують формування структурних пасток у відкладах різного віку, а також підвищення активності структур, що закладені раніше. Процес виявлення цих структур за допомогою КЗ має декілька етапів. На першому проводять дешифрування КЗ, одержаних з різних носіїв в широкому діапазоні часу. Перевага віддавалася КЗ видимого діапазону електромагнітного спектру. На цьому етапі була одержана схема розломно-блокової тектоніки Азово-Чорноморського регіону.

На другому етапі проводились дослідження з виявлення характеру неотектонічної активності. З цією метою були виконані морфометричні дослідження рельєфу дна Північно-Західного шельфу Чорного та Азовського морів за методикою А. Н. Ласточкіна [3]. На думку авторів, аналіз батиметричних карт, як один з прийомів в комплексі структурно-геоморфологічних досліджень, дозволяє зробити висновок, що наявність великих і різноамплітудних блоків на розломно-блоковій неотектонічній схемі відповідає різним значенням вектора вертикальних рухів земної кори на новітньому етапі розвитку цього регіону.

Диференційність вектора новітніх рухів, що обумовила гіпсометричну градацію рельєфу морського дна Північно-Західного шельфу Чорного та Азовського морів вплинула на розподіл уламкового матеріалу на межі літофаціальних зон четвертинних відкладень. Наприклад, черепашники, в значній мірі, пов'язані з найбільш піднятими ділянками рельєфу (структура Голіцина, група структур Бірючих) (рис. 1). Різниця спектральних характеристик черепашників, пісків і пелітових різновидностей осадових порід дозволяє опосередовано визначити положення неотектонічних аномалій (площинних та лінійних) на космічних знімках. Чим менша глибина, тим чіткіше неотектонічні аномалії простежуються в аномаліях фототону на КЗ (Азовське море). В акваторії Азовського моря, що має невеликі глибини, локальні структури характеризуються наявністю більш грубозернистого матеріалу, що відкладається в силу вищевказаних геофлюїдодинамічних процесів. Ці відклади мають відмінні спектральні характеристики, які знаходить своє відображення в аномаліях фототону КЗ (посвітлення фототону). Таким чином була дешифрована більша кількість відомих структур Азовського моря. А по космічних зображеннях, одержаних в 1988 та в 2000 роках, була значно розширена прогнозна площа в межах Північно-Стрілкової структури, що

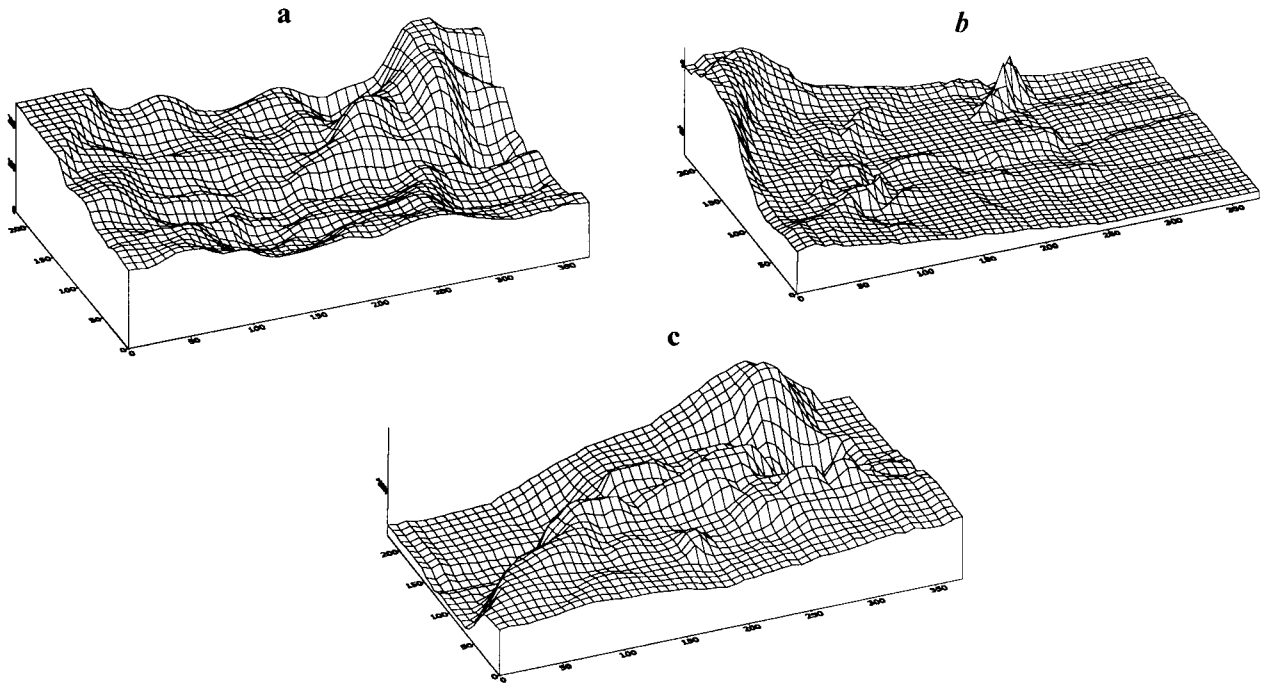


Рис. 1. Акваторія Азовського моря. Район структур Бірючих. Зіставлення (за попередніми даними): а — щільності фототону космічного знімку; б — рельєфу дна; в — поверхні відкладень верхньої крейди

чітко відображається в концентричній локалізації дугоподібних смуг фототону різної інтенсивності — від білого до темно-сірого (рис. 2). Аналіз літології донних відкладів та батиметрії дозволяє зробити висновок, що ця аномалія фототону відповідає піщаним пагорбам. По ідентичним геоіндикаційним ознакам, характерним для відомих локальних структур, було виявлено ряд прогнозних локальних об'єктів (на південний схід від Стрілкового родовища ВВ), де за результатами літофаціального аналізу відкладів майкопу можна очікувати наявність пасток. Із-за значних глибин в акваторії Чорного моря дешифрування проводилося в основному за непрямими геоіндикаційними ознаками, які пов'язані з гідрофізичними процесами (хвилі, апвелінг, каламутні потоки), а також за лінійними елементами хмарного покриву.

Однією із задач досліджень було уточнення тектонічної будови Азово-Чорноморського регіону по КЗ. На даний час відсутнє однозначне тлумачення самої важливої межі в Азово-Чорноморському регіоні — межі Східно-Європейської платформи (СЄП) та Скіфської плити (СП). На це давно звернули увагу у вітчизняній спеціальній літературі. Так, А. В. Чекунов ще у 1972 році [4] писав, що «на профілі ГСЗ через Азовське море чітких даних про розломи, що обмежують Східно-Європейську платформу, немає». М. І. Павлюк та О. П. Богаєць у 1978 р. [5] наводять 11 варіантів проведення цієї межі в Азово-Чорноморському регіоні, тоді як інші автори [6] вказують на 15 таких варіантів. Те ж саме відмічав в 1988 р. Р. Г. Гарецький з співавторами [7].

Аерокосмогеологічні дослідження, проведені авторами в даному регіоні в останні 10 років, дозволили внести деяку ясність в дискусійні питання. Це вважається принциповим, бо положення глибинних розломів контролює структурно-тектонічне районування та межі нафтогазоносних зон регіону, що особливо важливо для оцінки їх перспектив на поклади ВВ.

Одержані в результаті дешифрування КЗ схеми лінеаментів Азовського та Північно-Західного шельфу Чорного морів виглядають досить щільними (рис. 3). Середня щільність їх оцінюється величиною 0.38—0.40 км/км^2.

На Азовському морі виявлено цілий ряд лінеаментів, що перетинають всю акваторію і можуть бути ідентифіковані з більшим чи меншим ступенем достовірності з розломами, описаними в літературі. Разом з тим частина лінеаментів, що раніше не виявлялася, вказані як трансазовські та трансчорноморські. За попередніми даними по Азовському морю авторами виділено п'ять субпаралельних зон лінеаментів різної ширини: одна субширотна, та чотири діагональні (рис. 3).

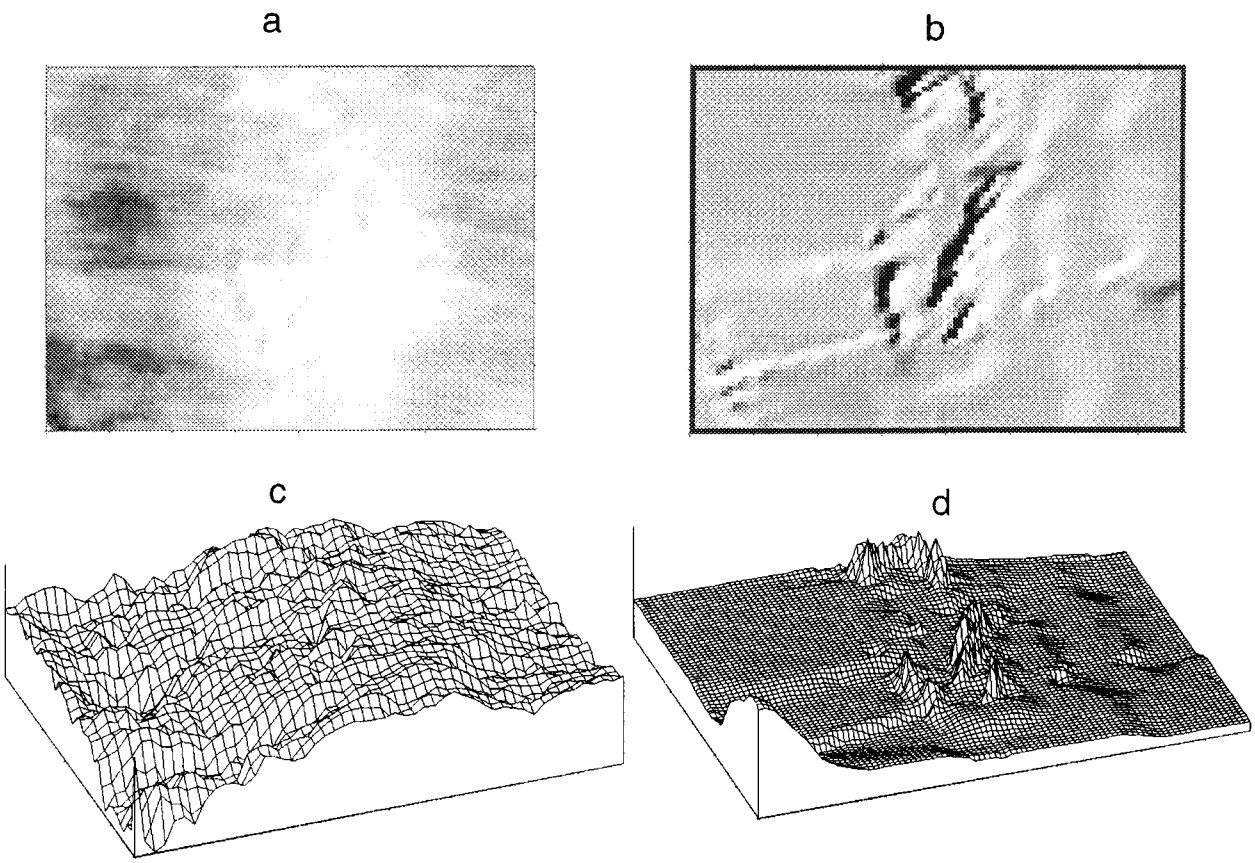


Рис. 2. Акваторія Азовського моря. Північно-Стрілкова структура. а — фрагмент космічного знімка; б — імітація фотозображення рельєфу; в — щільність фототону космічного знімка; г — рельєф морського дна

Субширотна зона лінеаментів прослідкується від південного краю півострова Бірючий до гирла р. Протока і в східній своїй частині тотожня Новотитарівському (Індольскому або ж Совєтсько-Ачуєвському) розлому [8—11]. Джанкойська-Єйська діагональна зона лінеаментів (ширина 10—15 км, азимут простягання 62±2°) відслідковується від м. Джанкой на заході до м. Єйськ на сході і на траверсі м. Бердянськ збігається з Головним Азовським розломом. Казантипсько-Приморську діагональну зону лінеаментів (ширина до 10 км, азимут простягання 15±2°) простежено від східної частини Казантипської затоки до м. Приморськ. Приморсько-Ачуєвська зона лінеаментів (азимут простягання 305±2°) прослідкується від м. Приморськ до м. Ачуєвськ. Приморсько-Темрюкська зона лінеаментів (ширина 10—15 км, азимут простягання 315± ±2°) простежена від м. Приморськ до м. Темрюк.

Слід відмітити, що, як правило, відомі розломи прослідкуються смугами паралельних зближених лінеаментів, що чітко проявляються на космічних зображеннях в лінійних аномаліях фототону. Ширина цих зон коливається в межах 5—20 км. Лінеаменти та відомі розломи створюють розломно-блоковий каркас морського дна, де різна амплітуда блоків обумовлена величиною амплітуди неотектонічних рухів.

Більшість дослідників вважають, що найважливішим фактором при визначенні структурно-тектонічного плану Північно-Західного шельфу Чорного моря є чотири основні глибинні розломи субмеридіонального простягання: Арцизько-Фрунзенський, Одеський, Миколаївський (Кіровоградсько-Миколаївський) та Криворізько-Євпаторійський (Євпаторійсько-Скадовський). Майже паралельно та трохи на захід від останнього на деяких тектонічних картах виділяють Херсонський розлом, що вважається авторами одним із лінеаментів Євпаторійсько-Скадовської зони порушень.

Важливе значення згаданих розломів як граничних елементів гетерогенних структур фундаменту підкреслено різними дослідниками. Так, Одеський розлом розглядається як східна межа Преддобруджинського прогину. Арцизько-Фрунзенський (Са-

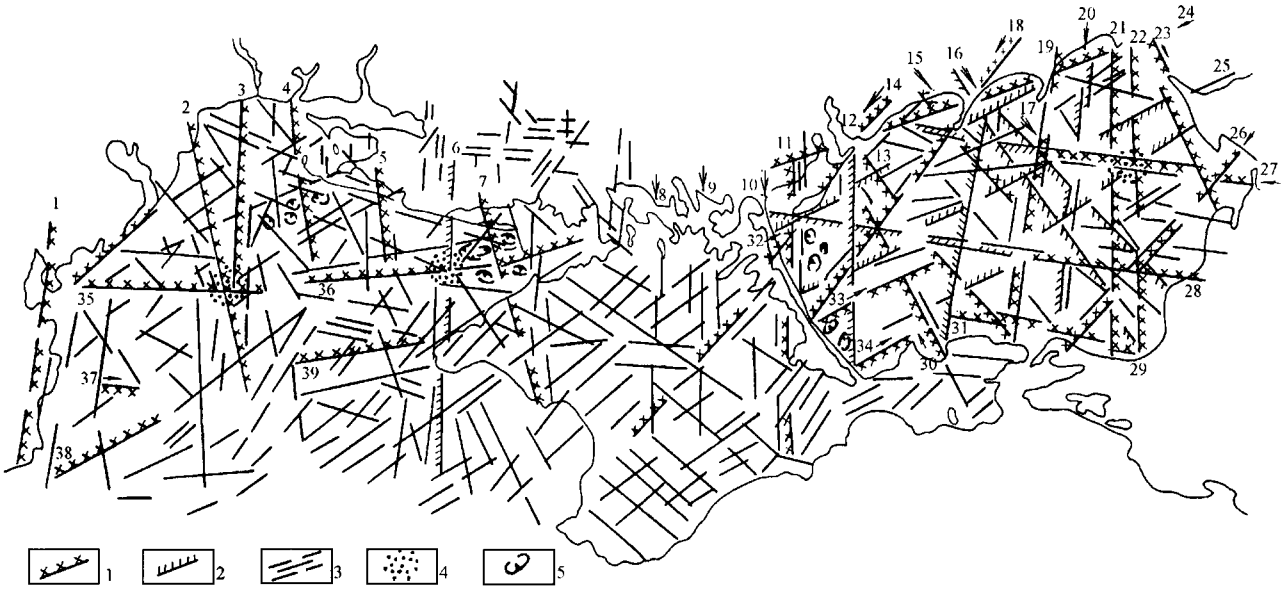


Рис. 3. Схема лінеаментів Азово-Чорноморського регіону за даними космічних зйомок. Умовні знаки: 1 — лінеаменти, що зіставляються з глибинними розломами; 2 — трансазовські та трансчорономорські лінеаменти, природа яких не з'ясована; 3 — лінеаменти, що ототожнюються з лінійними зонами розущільнення порід, можливо — розломами; 4 — ГФДС, виділені в період 2000-2001 рр.; 5 — прогнозні локальні об'єкти. Цифрами на схемі позначені розломи та лінеаменти: 1) Арцизько-Фрунзенський, 2) Одеський, 3) Одесько-Тальнівський, 4) Очаківський, 5) Миколаївський, 6) Херсонський, 7) Криворізько (Скадовсько)-Євпаторійський, 8) Центрально-Кримський (фрагмент), 9) Конксько-Білозерський (фрагмент), 10) Оріхово-Павлоградський (фрагмент), 11) Мелітопольсько-Нижньогорський, 12) Феодосійсько-Мелітопольський, 13) Керченсько-Мелітопольський, 14) Західно-Приазовський = Новоцарицинсько-Мелітопольський, 15) Сергієвсько-Темрюкський, 16) Приморсько-Темрюкський, 17) Приморсько-Ачуєвський, 18) Севастопольсько-Казанський, 19) Бердянський, 20) Білосарайсько-Таманський, 21) Губкінсько-Центральноазовський, 22) Кальміус-Джигинський, 23) Слов'янсько-Ахтирський, 24) Геніческо-Бердянсько-Кальміуський, 25) Джанкойсько-Єйський, 26) Пограничко-Єйський, 27) Головний Азовський (східний фрагмент) = Бейсуг-Обіточний, 28) Новотитарівський = Інгульський (східний фрагмент) = Геніческо-Ачуєвський, 29) Південно-Азовський (східний фрагмент), 30) Горностаєвський, 31) Казантип-Приморський, 32) Головний Азовський (західний фрагмент) = Джанкойсько-Маріупільський, 33) Советсько-Ачуєвський (західний фрагмент) ≈ Новотитарівський apprох Інгульський, 34) Піденно-Азовський (східний фрагмент) = Арабатсько-Єйський, 35) Елемент шовної зони, 36) Голіцинський (фрагмент), 37) Сулинський (фрагмент), 38) Кримсько-Георгіївський (фрагмент), 39) Михайлівський (фрагмент)

ратський) розлом у платформеному чохлі «слід розглядати західною межею виступу Зміїного» [6]. Миколаївський розлом ледь виявляється на розрізі морського профілю ГСЗ-25, а південніше, у межах Скіфської плити, він виділяється, ймовірно, лише на одному з трьох проведених на Північно-Західному шельфі субширотних профілів. У 1975 р. А. В. Чекунов [10] відмічав, що Кіровоградсько-Миколаївський розлом на південному схилі Українського кристалічного масиву (УКМ) простежується за гравітаційними та магнітними даними. На південь від схилу УКМ, у Чорному морі, цей розлом обмежує зі сходу підняття Голіцина, а на заході від берегів Криму проявляється у різкому згущенні та повороті ліній ізотропності палеогенових відкладів, змінюючи субмеридіональну орієнтацію.

Автори спробували прослідкувати ці розломи у межах акваторії Чорного моря по КЗ. Трасування Арцизько-Фрунзенського (Саратського) розлому, на погляд авторів, трактується в усіх друкованих працях майже однозначно та не викликає сумніву. Можливо, це обумовлено тією обставиною, що траса розлому проходить переважно по суходолу.

Важливе значення Одеського розлому та його трасування по Чорному морю давно підмітили В. Ю. Хаїн та Я. П. Маловицький, які вважали, що це порушення (Одесько-Синопське, Трансчорноморське) тягнеться від Одеси до Південного берега Чорного моря поміж міст Амасра та Синоп, де воно з'єднується з гілкою Головного Анатолійського розлому, «розділяючи Чорноморський регіон на два великих сегменти: Добруджинсько-Західно-Анатолійський та Кавказько-Східно-Анатолійський» [10]. Вказані дослідники трасували це порушення під азимутом 150°. На регіональних геологічних картах воно трасується під близьким азимутом — 150—155°. На «Тектонической карте Юго-Запада СССР» [7] це порушення трасується двома гілками, західна з яких іде по близькому азимуту (165-170°), а східна, що ототожнюється з Одесько-

Тальновським розломом, проходить субмеридіонально та зливається з першою у 100 км на південь від Одеси, у зоні зчленування Скіфської плити і Східно-Європейської платформи.

За даними авторів обидві гілки цього порушення дешифруються у вигляді двох щільних систем лінеаментів (160° та 0°), серед яких важко віддати перевагу будь-якому з них для точного трасування. У зв'язку з цим автори обрали напрямки, які ближче за все відповідають таким, що зображені на регіональних тектонічних картах.

Найчіткіше дешифрується Одеський розлом на КЗ, одержаних з ШСЗ «Landsat», гірше — з «Океан-О» та NOAA. На зображеннях прослідкується субмеридіональна лінійна аномалія фототону — межа водних потоків з різною насиченістю мулами. Місцеположення цієї лінійної аномалії контролюється палеоруслом Пра-Дніпра. Південніше шовної зони Одеський розлом прослідкується як одна смуга до структури Одеська. Саме на цьому відрізку розлом був активний на протязі всього часу свого існування. Він прослідкується в незначних інградієнтних зонах по поверхні відкладів докрейдяного, пізньокрейдяного, ранньопалеоценового віку, в уступі рельефу морського дна та контролює межі літофаціальних зон четвертинних морських відкладень. Неотектонічна активність розлому й обумовила його проявлення на КЗ.

Близькі висновки отримані при простежуванні Миколаївського розлому. На КЗ він трасується як субмеридіональна система лінеаментів завширшки 10—15 км від середини Тендровської коси до зони зчленування СП та СЄП та далі на південь — як смуга лінеаментів з азимутом 165—170° завширшки 20—25 км, що простежується приблизно до широти м. Севастополь [8, 9, 12]. Деякі з чітко вираженних лінеаментів в зоні розлому трасуються між структурами Голіцина і Шмідта. Відображення найбільш активної частини розлому на КЗ обумовлене його успадкованим розвитком з докрейдяного віку до сучасного, що підтверджено геофізичними та геоморфологічними дослідженнями.

На межі Скіфської плити та Східно-Європейської платфоми на КЗ «віялоподібно» простежуються кілька субширотних серій зближених субпаралельних лінеаментів. Перша смуга лінеаментів завширшки 10—15 км йде від північної частини Тарханкутського півострова у бік Іллічівського підняття і далі майже на 100 км у цьому ж напрямку — на південний захід по азимуту 240°. Звідси ж іде смуга лінеаментів у напрямку Михайлівської западини завширшки 5—10 км (азимут 250°), яка збігається з Кримсько-Георгієвським розломом. Ширша смуга лінеаментів (20—30 км) та супутних їм за азимутом (270—280°) фрагментів простежується у напрямку підняття Голіцина та далі на південний захід, відхиляючись по азимуту 240°, до перетину з гілками Одеського розлому. На схід від Одеської структури ця смуга лінеаментів відслідковується ще близько 50 км. Натомість ще одна гілка лінеаментів простягається на захід (280°) та збігається з Болградським розломом. Таким чином, з певним ступенем ймовірності, можна сказати, що значна частина шовної зони знаходить своє відображення на КЗ у вигляді широкої смуги субширотних лінеаментів.

В місці перетину Одеського розлому з різноорієнтованими лінеаментами (субширотими та діагональними) в межах шовної зони утворився геодинамічний вузол, де можна очікувати осередки розущільнення порід, сприятливих для флюїдодинаміки. Ця структура розташована в межах припідняного неотектонічного, просторово тяжіє до палеорусла Пра-Дніпра, і може бути перспективною для пошуків покладів ВВ.

В результаті дешифрування КЗ були виділені не тільки відомі регіональні і локальні розломи, що дешифруються як лінеаменти, але й нові лінеаменти та їх зони, що при геолого-геофізичній інтерпретації можуть набути рангу розломів та лінійних зон розущільнення порід (рис. 3). Так, на сейсмопрофілі 528847 субмеридіональному лінеаменту відповідає розлом, що ускладнює горизонти відбиття *III* та IV (теригенна товща нижньої крейди) на Східно-Голіцинській площі. Не виключено, що тут ідеться про крайній східний фрагмент Миколаївської зони порушень.

Субмеридіональна лінеаментна зона (Херсонська) розташована на схід від Миколаївського розлому, має ті ж самі індикаційні ознаки, що й Миколаївський, і може відповідати глибинному розлому. В межах цієї зони також виділяється ГФДС, де виходячи з літофаціальних властивостей та розповсюдження відкладів нижньої крейди в цій частині регіону можна очікувати наявність пасток ВВ.

Лінеаменти та відомі розломи утворюють в неотектонічному плані систему різноамплітудних блоків, де більш піднятим блокам відповідають аномалії фототону на КЗ. Ряд таких блоків розташовано на північ від структури Голіцина. В одному з них знаходиться органогенна споруда в коньяк-туронських відкладах верхньої крейди, яку дослідники УкрНДГРІ виділяють під назвою Біостромна. Аналогічні за індикаційними ознаками блоки розташовані північніше цієї структури. Особливості розповсюдження верхньої крейди в цьому районі дають підстави очікувати в цих блоках органогенні споруди на зразок Біостромної. З цих позицій можуть бути перспективними блоки, розташовані на схід від структури Шмідта. Слід звернути увагу на той факт, що при зіставленні лінеаментної сітки Північно-Західного шельфу Чорного і Азовського

морів та структурно-формаційної схеми Криму [13, 14] прослідковується досить чіткий взаємозв'язок лінеаментів обох акваторій з розломами Криму.

В результаті аерокосмогеологічних досліджень в Азовському та Північно-Західному шельфі Чорного морів в 1996 році була обгрунтована і рекомедована до апробації серія ГФДС, що викликають нафтогазопошукове зацікавлення. В 1998 р. у межах двох ГФДС [15] були виявлені промислові скупчення ВВ: Північно-Казантипське в Азовському і Безіменне в Чорному морях.

Досвід використання супутникової технології у вивченні геологічної будови та виявлення нафтогазопошукових обєктів (Азовське та Північно-Західний шельф Чорного моря) дозволяють зробити висновок, що ця технологія, яка базується на матеріалах теплової та багатозональної космічних зйомок з комплексним використанням даних структурно-геоморфологічних досліджень, забезпечує рішення ряду геологічних задач на шельфі:

1. Вивчення розломно-блокової структури, оцінка неотектонічної активності блокових полів, виявлення і трасування лінійних зон напружено деформованого стану літосфери, в тому числі і тих, що ускладнені проявами розривних різноамплітудних деформацій.

2. Картування геофлюїдодинамічних структур (ГФДС) літосфери, що відіграють першочергове значення у вертикальній міграції ВВ та формуванні вторинних покладів. Зв'язок таких покладів ВВ з геофлюїдодинамічними структурами в Азовському та Північно-Західному шельфі Чорного морів носить закономірний характер і може бути використаний в якості нафтогазопошукового критерію. Так, в межах двох ГФДС, що виявлені в Азовському морі в 1996 р., в 1998 р. відкрито Північно- та Східно-Казантипські газоконденсатні родовища.

3. Прогнозування нафтогазопошукових об'єктів. Досвід дозволяє стверджувати, що теоретична модель нафтогазогеологічних, ландшафтних та гідрофізичних процесів, що складають наукову основу супутникової технології, адекватні реальним моделям, що забезпечує достатньо високу достовірність результатів дослідження.

Перспективи удосконалення та впровадження супутникової технології пов'язуються з глибшим вивченням комплексу геоіндикаційних ознак ландшафту морського дна та морської поверхні, взаємодій фізико-хімічних процесів літосфери, гідросфери і атмосфери, геодинамічних, флюїдодинамічних, неотектонічних та нафтогазогеологічних процесів, ширшої апробації технології у виробничому режимі.

1. Перерва В. М. Флюїдопровідні структури літосфери та їх роль у формуванні родовищ корисних копалин // Мінеральні ресурси України.—1997.—№ 1-2.—С. 24—30.
2. Перерва В. М. Спутниковая информация в изучении флюидопроводящих структур литосферы // Космічна наука і технологія.—1998.—**4**, № 2/3.—С. 126—132.
3. Ласточкин А. Н. Методы морского геоморфологического картографирования. — Л.: Недра, 1982.—272 с.
4. Чекунов А. В. Структура земной коры и тектоника юга Европейской части СССР. — К.; Наук. думка, 1972.
5. Павлюк М. І., Богаєць О. Т. Тектоніка і формації області зчленування Східно-Європейської платформи і Скіфської плити. — К.: Наук. думка, 1978.—146 с.
6. Соллогуб В. Б., Чекунов А. В., Пустыльников М. Р. и др. Геология шельфа УССР. Тектоника. — К.: Наук. думка, 1987.—150 с.
7. Гарецкий Р. Г., Глушко В. В., Крылов Н. А. и др. Тектоника нефтегазоносных областей Юго-Запада СССР (Объяснительная записка к Тектонической карте нефтегазоносных областей Юго-Запада СССР с использованием материалов космических съемок масштаба 1:500 000). — М.: Наука, 1988.—85 с.
8. Гавриш В. К. и др. Тектоника и перспективы нефтегазоносности акватории Азовского моря по данным дешифрирования и комплексной интерпретации космических снимков // Геол. журн.—1987.—**47**, № 4.—С. 11—18.
9. Чекунов А. В., Веселов А. А. Гилькмен А. И. Геологическое строение и история развития Причерноморского прогиба. — К.: Наук. думка, 1976.—163 с.
10. Чекунов А. А., Маловицкий Я. П. Глубинные разломы и блоковое строение земной коры // Земная кора и история развития Черноморской впадины. Результаты исследований по Международным геофизическим проектам. — М.: Наука, 1975.—С. 308—316.
11. Чебаненко И. И. и др. Использование аэрокосмических снимков для выявления разломов и неотектонических движений Крыма и Приазовья // Аэрокосмическое изучение современных и новейших тектонических процессов. — М.: Наука, 1988.—С. 12—16.
12. Шнюков Е. Ф. и др. Геология Азовского моря. — К.: Наук. думка, 1974.—247 с.
13. Казанцев Ю. В. Тектоника Крыма. — М.: Наука, 1982.—112 с.
14. Борисенко Л. С., Плахотный Л. Г. Геодинамика Крымско-Азовского региона как следствие многоуровневого тектогенеза // Матер. конф. «Геодинамика Крымско-Черноморского региона». — Симферополь, 1997.—С. 31—36.
15. Перерва В. М., Лялько В. І., Шпак П. Ф. Флюїдопровідні структури і нафтогазоносність Азово-Чорноморського регіону // Доп. НАНУ.—1997.—№ 4.—С. 136—138.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 187—197

Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов

В. М. Перерва, Е. И. Левчик, А. И. Архипов

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Одним из путей повышения эффективности нефтегазопоисковых робот является дистанционное изучение оптического поля ландшафтов. Это научное направление разрабатывается в Центре аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины более 10 лет. Сущностью данного направления исследований, составляющего научную основу создания спутниковых технологий прогноза залежей нефти и газа, является изучение закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с компонентами ландшафтов (растительностью, почвами) с целью оценки их состояния, позволяющее оперативно получать важную информацию о продуктивности нефтегазопоисковых объектов.

Важным элементом комплекса факторов, обуславливающих формирование полезного сигнала, связанного с влиянием залежей УВ, являются пути их вертикальной миграции от залежи к корнеобитаемому слою растений. По нашим представлениям [24, 25, 27, 28] модель структур литосферы, по которым развиваются процессы миграции УВ и получившими в наших работах название геофлюидодинамических структур литосферы (ГФДС), представляется следующим образом.

Имеющиеся к настоящему времени данные, полученные преимущественно по материалам аэрокосмических съемок, позволяют сформулировать следующую модель их формирования и строения. Формирование ГФДС, как своеобразных структур литосферы, связано с узлами пересечения вертикальных зон напряженно-деформированного состояния литосферы (ВЗНДС). Хотя природа этих образований во многом остается непознанной, тем не менее их сущность в общем виде вырисовывается достаточно однозначно. Проекцией на земную поверхность (следом на земной поверхности) ВЗНДС являются прямолинейные зоны, дешифрируемые на аэрокосмических снимках как линеаменты. Наиболее важные свойства ВЗНДС отчетливо прослеживаются по характерным признакам линеаментов.

В плане ГФДС имеют, как правило, изометричные очертания и по этой причине их нередко относят к большой полигенетической группе кольцевых образований.

Размеры ГФДС зависят от ширины формирующих их ВЗНДС и варьируют от 1 до 200 км (возможно и более). Структура ГФДС имеет ярко выраженный гетерогенный характер, выражающийся в чередовании участков низкой и высокой проницаемости. Последние, как элементарные образования ГФДС, названы нами очагами разуплотнения. Их размеры составляют в поперечнике 300—400 м. При этом не исключается, что размеры очагов могут быть и меньшими.

ГФДС выражены практически во всех компонентах ландшафтов: рельефе, гидросети, почвах, растительности. Пожалуй, наиболее универсальным признаком выражения ГФДС являются спектральные характеристики растительности, приобретающие в зоне ГФДС аномальный характер.

Ландшафт над залежью углеводородов (УВ) характеризуется локальным изменением физико-химических параметров его элементов. В настоящее время считаются доказанными аномальные изменения геофизических, геохимических и биохимических процессов в пределах нефтегазоносных структур. В этих структурах имеют место чередование зон повышенных и пониженных механических напряжений, которые обусловливают возникновение разных видов энергии, интенсивный перенос потоков тепла, жидких и газообразных флюидов. В зонах аномально низких значений механических напряжений, которые соответствуют участкам аномальных фильтрационных свойств горных пород, развиваются окислительно-восстановительные процессы. Вследствие этого в данных зонах формируются зонально-кольцевые аномалии полей: **геофизических** (электромагнитных, гравитационных, тепловых, радиационных, упруго-деформационных, сейсмоакустических и др.), **геохимических**

© В. М. ПЕРЕРВА, Е. И. ЛЕВЧИК, А. И. АРХИПОВ, 2002

(элементных, солевых, газовых и др.), **биохимических** (бактериальных, микрофлористических) [11].

Вследствие неоднородности осадочных пород, влияния нарушений, особенностей поверхностных отложений форма газовых аномалий и концентраций УВ, как показали многочисленные исследования, бывают «прямыми», когда максимум газообразования наблюдается над газовым или нефтяным месторождением (таких довольно мало), и кольцевыми, у которых максимальные значения газообразования приурочены к крыльям структур, а минимальные наблюдаются над их сводами. Наличие диффузионно-фильтрационного потока УВ от залежи способствует возникновению специфических геохимических условий в почвенно-грунтовой зоне месторождения и вызывает изменения микробиологического режима в этих слоях, которые, в свою очередь, влияют на бактериальную и грибную составляющие микробного сообщества, формируя специфические условия для роста растений [10, 20, 30].

Для обнаружения спектральных аномалий, связанных с воздействием указанных процессов, нужны специальные виды съемок и обработки их материалов, например многозональная съемка и синтезирование зональных аэрокосмоизображений.

Исходной посылкой при разработке методов дистанционной фитоиндикации является положение о наличии корреляций между влиянием определенных факторов внешней среды и откликом на них растений [3, 5, 7, 8, 14, 15, 17, 21]. Это положение основано на всеобщем принципе единства живых организмов и окружающей среды. Растительный покров (РП) является одним из важнейших компонентов ландшафта и играет ключевую роль в функционировании экосистем. Он определяет кислородный и энергетический баланс планеты, характер почвообразовательных процессов, является носителем генетической информации, обеспечивая существование и эволюцию жизни на Земле. Широкое освоение дистанционных методов изучения РП послужило новым стимулом развития моделей их радиационного режима (МРР). Разработка проводится с целью расчета спектральных отражательных характеристик РП как функций оптико-биологических параметров РП [5, 13, 15, 18, 10, 22].

С точки зрения оптики растение представляет собой полупрозрачное тело, которое частично поглощает солнечное излучение, частично отражает его и частично пропускает (рис. 1). Взаимосвязь этих процессов представлена уравнением энергетического баланса

$$I_\lambda = R_\lambda + A_\lambda + T_\lambda, \qquad (1)$$

где I_λ — падающая энергия, R_λ — отраженная энергия, A_λ — поглощенная энергия, T_λ — пропускаемая энергия [7, 13, 15].

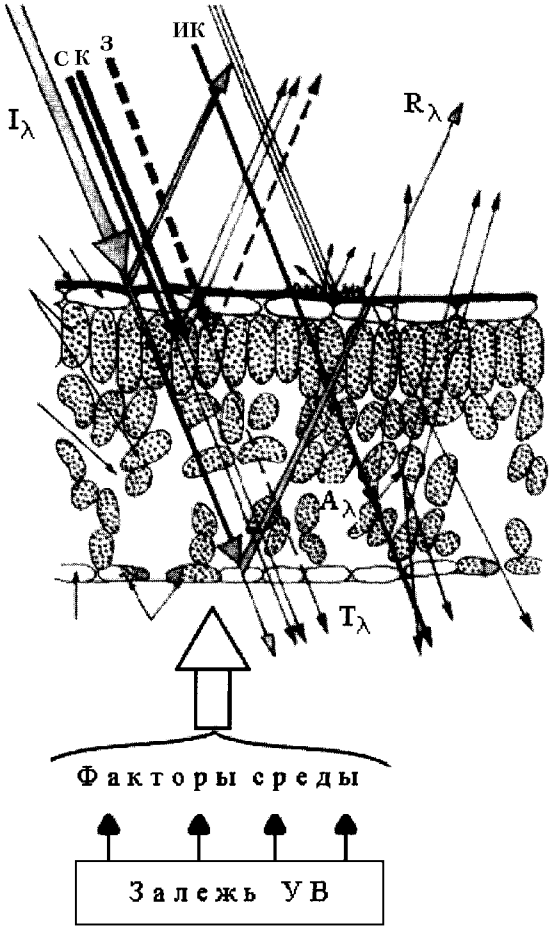


Рис. 1. Модель радиационного режима зеленого листа над залежью УВ. Условные обозначения: С — синяя зона спектра, З — зеленая зона спектра, К — красная зона спектра, ИК — инфракрасная зона спектра

Воздействие различных факторов среды, в том числе и обусловленных залежью УВ, сопровождаются в РП перераспределением между составляющими МРР. При аэрокосмической съемке регистрируется только отраженный поток электромагнитного излучения R_λ. Поэтому при наличии

$$\Delta R_\lambda = R_{\lambda\text{ф}} - R_{\lambda_\text{о}} \neq 0 \qquad (2)$$

(где $R_{\lambda\text{ф}}$ — значения радиационных потоков, отраженных РП над фоновым участком, $R_{\lambda_\text{о}}$ — над объектом) можно выявить воздействие интересующих исследователя факторов окружающей среды на РП.

Основным органом (чувствительным элементом), воспринимающим солнечную радиацию, является лист, и от его оптических свойств в значительной

степени зависит энергообеспеченность растения и функционирование РП. Закономерности спектрального отклика листа в принципе справедливы и для растительных объектов более высокого уровня организации: растения в целом, растительных сообществ, РП. Спектральная область поглощения радиации листом включает УФ-, видимые и ИК-лучи. УФ-лучи (240—400 нм) практически полностью поглощаются клеточными оболочками, ферментами и различными пигментами. ИК-лучи поглощаются водой, содержащейся в тканях листа, и цитоплазмой. В видимом диапазоне спектр поглощения листа характеризуется двумя максимумами, в оранжево-красной (660—680 нм) и сине-фиолетовой (460—490 нм) зонах, и обусловлен наличием и функционированием растительных пигментов. Необходимо отметить, что пигменты играют исключительную роль в жизни растений. Так, благодаря особым фотосинтетическим пигментам в процессе фотосинтеза происходит преобразование энергии света в энергию макроэргических химических связей в масштабе Земли, что делает растения одним из важнейших звеньев пищевой цепи. Существование растений, их выживание в различных условиях среды определяется функционированием пигментов, выполняющих фотозащитную, морфолого-приспособительную, регуляторную функции. Практически все пигменты вносят свой вклад в формирование кривой поглощения в видимом диапазоне, хотя определяющими являются хлорофиллы [5, 17, 32—37].

Как установлено многочисленными исследованиями с использованием более 1400 видов растений из разных таксономических групп в различных экологических условиях и на разных географических широтах, положения красного и синего максимумов поглощения весьма стабильны [32]. Это позволяет рассматривать лист как универсальное устройство для поглощения солнечной радиации. Количество поглощаемой радиации в значительной степени определяется содержанием и составом пигментов, особенностями поверхности листа и его внутренней структуры, содержанием воды. Часть поглощенной радиации может переизлучаться в виде тепла или флуоресценции, а непоглощенная часть отражается от поверхности и внутренних структур фитоэлементов. Отраженная радиация может быть зарегистрирована дистанционно. Большинство приборов дистанционного зондирования работает в диапазоне длин волн от 300 до 3000 нм. В соответствии с существующими представлениями можно выделить два типа рассеяния света листьями: частично зеркальное рассеяние на поверхности верхнего слоя кутикулы и многократное внутреннее отражение на оптически неоднородных структурах листа, которое имеет диффузный характер [32—34, 36]. Первой границей раздела фаз на поверхности листа, с которым взаимодействует падающее излучение, является многослойная кутикула. Эпикутикулярный воск (поверхностный слой) имеет кристаллоподобную структуру и обуславливает частично зеркальный характер отражения. Сложная неортотропная поверхность многих листьев (микрорельеф поверхности, наличие и характер опушения) также способствует многоразовому отражению в поверхностном слое. На характер рассеяния света могут оказывать влияние первичная и вторичная клеточные стенки, имеющие в своем составе упорядоченно упакованные целлюлозные микрофибриллы, которые придают стенкам кристаллические свойства, срединная пластинка и т. д. Основной поток излучения формируется в клетках губчатого мезофилла в силу наличия значительного количества межфазных переходов клеточная стенка — воздух. Спектральную отражательную характеристику растительного объекта (отдельного листа, зеленого растения, РП) можно представить в виде типичной кривой (рис. 2).

Как видно, отражательная способность растительного объекта в видимом диапазоне минимальна вследствие высокого поглощения света данных длин волн различными пигментами. Минимумы на кривой отражения совпадают с двумя основными полосами поглощения хлорофилла. Между этими полосами наблюдается довольно высокое отражение в зеленой зоне (530—540 нм), что обусловливает привычную зеленую окраску вегетирующих растений. Существенное влияние на форму кривой отражения зеленых листьев оказывают антоцианы. Даже небольшое их количество вызывает снижение отражения в зеленой зоне спектра и приводит к смещению максимума отражения в более длинноволновую сторону (630 нм), что визуально фиксируется как покраснение. Наибольшее количество антоцианов регистрируется в молодых и новообразованных листьях и побегах. Наличие каротиноидов в зеленом растении, обычно замаскированное хлорофиллом, становится заметным, например при старении, когда основная масса хлорофилла разрушается (осеннее расцвечивание листвы).

В ближнем инфракрасном диапазоне (БИК) отражательная способность листвы заметно возрастает, начиная приблизительно с 700 нм. Для большинства видов растений коэффициент отражения в БИК-диапазоне составляет приблизительно 45—50 %, коэффициент пропускания — 45—50 %, коэффициент поглощения — менее 5 %. Установлено, что на отражательную способность в БИК-диапазоне влияет сложная внутренняя структура фитоэлементов. Известно, что лист как оптическая система отличается чрезвычайно сложной внутренней структурой и на уровне тканей (различные

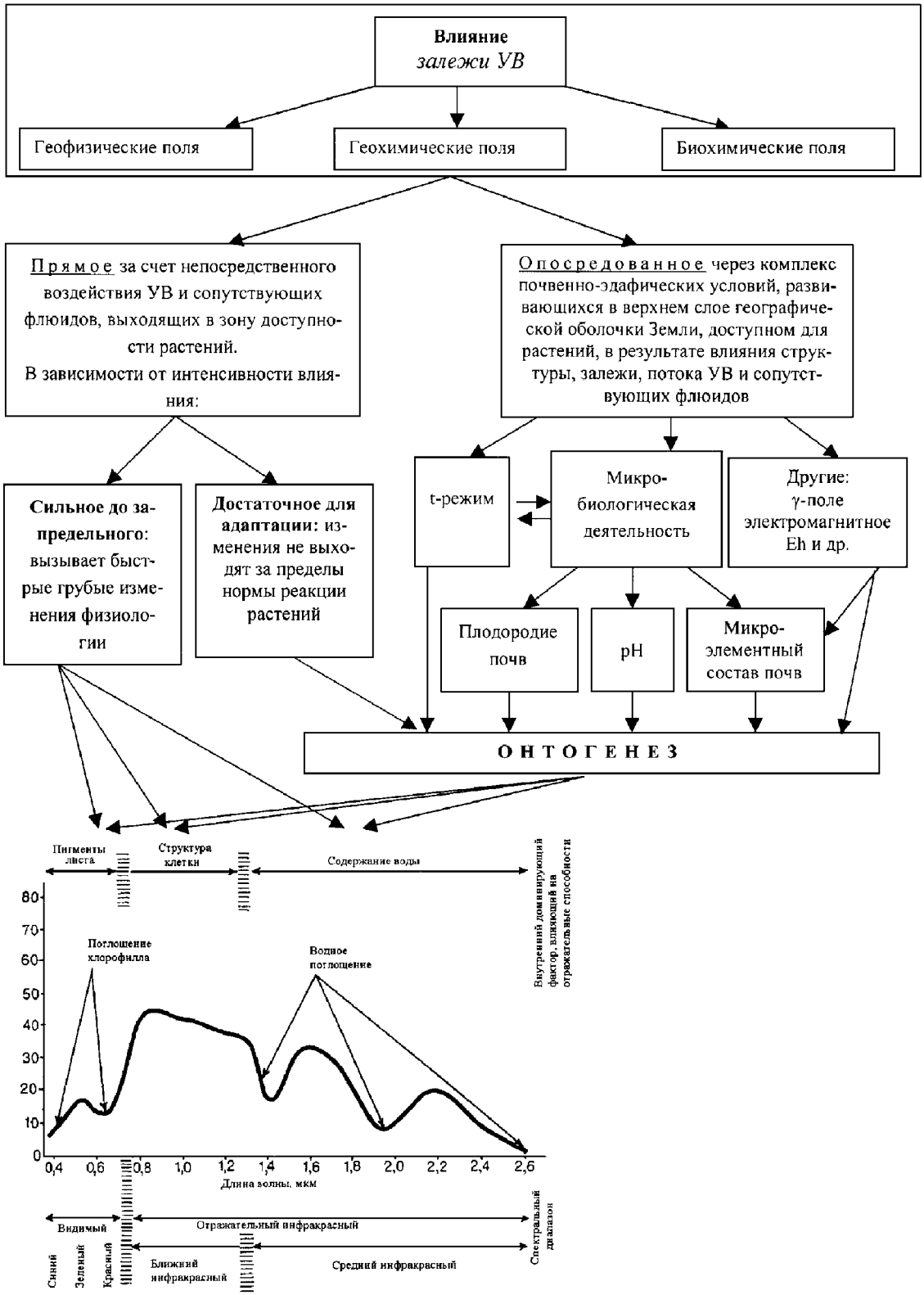


Рис. 2. Схема влияния залежи УВ на основные характеристики спектрального отклика растительности (модифицированная схема [7])

слои клеток, проводящая система), и на уровне клетки (хлоропласты, способные к перемещениям и поворотам, сложная динамичная система мембранных структур), и на уровне хлоропласта (система ламелл и гран, количество и распределение молекул пигмента в гранах). Разнообразие структурных элементов и обилие межфазных границ обусловливает большое внутреннее рассеяние и отражение света. Поэтому даже самый тонкий лист поглощает света значительно больше, чем слой раствора пигментов соответствующей концентрации [33—34]. Вместе с тем сложность внутренней структуры листа предоставляет большие возможности для ее перестройки на разных уровнях — тканевом, клеточном, внутриклеточном, в зависимости от условий освещенности, а также под влиянием иных экологических факторов. Различия анатомо-морфологической структуры листьев разных видов здоровых растений, а также листьев особей одного вида растений, произрастающих в отличающихся условиях, сопровождаются достаточно четкими различиями кривых отражения в БИК-диапазоне.

Высокое пропускание листом электромагнитного излучения в БИК-диапазоне в натурных условиях приводит к тому, что отражение в этом диапазоне от растения и РП в целом может достигать 85 % [7, 13]. Это явление обусловлено аддитивной отражательной способностью: энергия, пропущенная через верхний слой листьев и отраженная от второго слоя, частично передается обратно через первый слой. При наличии многослойной листовой поверхности данный процесс повторяется многократно, сопровождаясь усилением отражения, пропорциональным количеству слоев (ярусов в пределах кроны) листьев [7, 13, 14]. На отражательную способность листа в БИК-диапазоне (от 760 до 1300 нм) наряду с внутренней структурой оказывают влияние и полосы поглощения воды.

Отражение листа в среднем ИК-диапазоне (1300—2600 нм) практически полностью находится под влиянием полос поглощения воды. Установлена обратная зависимость отражательной способности листа в этом диапазоне и общим содержанием воды.

Рассмотренные выше закономерности распределения отраженного потока солнечной энергии в спектре растения проявляются как в отдельно взятом листе, так и в листве различных видов растений и в спектральных характеристиках РП в целом [7, 9, 14]. Растительные ценозы могут включать в себя элементы, каждый из которых сам по себе обладает низкой чувствительностью по отношению к отдельным факторам. Благодаря кумулятивному эффекту за длительное время происходят изменения состояния систем высшего порядка, что позволяет использовать дистанционные методы для пространственно-временной фитоиндикации природных и антропогенных аномалий [21].

Растительный покров, согласно классификации спектральных отражательных свойств природных образов [13], относится к классу II, характеризующемуся максимумом на 550 нм, минимумом в пределах главной полосы поглощения хлорофилла (660—680 нм), за которым следует резкий подъем в сторону длинных волн. Класс неоднороден. В зависимости интенсивности отражения при 550 нм и 800 нм растительных сообществ разделяется на типы: *тип 1* — хвойные породы лесных насаждений (наиболее низкие отражательные характеристики); *тип 2* — РП с недостаточно сочной растительностью (суходольные луга, хвойные породы летом и др.); *тип 3* — сочные травяные покровы, лиственные насаждения в период активной вегетации; *тип 4* — лесные насаждения в период осенней раскраски и созревшие сельскохозяйственные культуры.

Детальный анализ кривых отражения лесных массивов и отдельных листьев [1], показал, что лесные насаждения характеризуются кривыми отражения с менее четко выраженными максимумами в желто-зеленой зоне и более размытым минимумом в области красных и синих лучей. Интегральная интенсивность отражения (КСЯ) лесных массивов в диапазоне 400—700 нм в 1.5—3 раза ниже, чем КСЯ отдельного листа. В БИК—диапазоне (760—1100 нм) значения КСЯ отдельных листьев и крон практически совпадают.

В радиационный режим леса существенный вклад вносит лесная подстилка, отражательные свойства которой определяются соотношением проективного покрытия вегетирующей растительности, оголенной почвы и опада, их яркостью и цветом [7, 14, 15]. Характер спектральной кривой изменяется в зависимости от случайной ориентации листьев и многократного перепоглощения ими и переотражения от них ИК-излучения в пределах кроны. Согласно математической модели прохождения потока солнечной радиации через сплошной РП спектральное отражение можно рассматривать как функцию суммарной поверхности фитоэлементов, коэффициентов поглощения, рассеяния и отражательной способности субстрата [7, 14]. Коэффициенты эти находятся в зависимости от оптических свойств фитоэлементов РП, от высоты РП, густоты, характера теневых и световых участков. С увеличением густоты РП уменьшается КСЯ в диапазоне 600—700 нм вследствие высокого поглощения массой хлорофилла, тогда как в диапазоне 700—800 нм отражение возрастает вследствие значительного рассеяния листьями. Важными являются условия освещения (высота солнца, условия облачности), и визирования, а также свойства атмосферы как сре-

ды, через которую проводятся наблюдения [7, 13—15, 19].

Таким образом, спектральная кривая отражения в видимом и ИК-диапазонах несет в себе прямую и опосредованную информацию о состоянии листа и РП в целом, о качественных и количественных особенностях пигментного состава и функционировании фотосинтетического аппарата, структуре листа и других фитоэлементов, особенностях поверхности, степени оводненности. Логично предположить, что любое воздействие на растительный организм, затрагивающее прямо или косвенно функционирование его систем жизнеобеспечения, найдет свое выражение в изменениях спектров отражения.

Факторы, действующие на растительный организм, принято разделять на внутренние и внешние.

К основным внешним факторам относятся факторы окружающей среды (свет, температура, условия влагообеспеченности) и условия минерального питания, т. е. те факторы, которые определяют существование и характер РП, и к которым растения данной территории филогенетически адаптированы. Так, спектральный состав света определяет количество антоцианов [3, 32]. Интенсивность света определяет содержание антенного хлорофилла (обратная зависимость) и накопление каротиноидов (прямая зависимость), что ярко проявляется у световых и теневых, а также высокогорных растений [32]. Свет через систему фитохром — гормоны непосредственно влияет на скорость и направленность ростовых процессов на формирование анатомо-морфологической структуры листа и растения в целом. Температурный фактор ограничивает жизнедеятельность растительных организмов во времени, влияя на активность ферментов и регулируя интенсивность обменных процессов, в том числе накопление пигментов. Влияние температуры отчетливо проявляется в ИК-диапазоне: яркость возрастает в дневное время и в безоблачную погоду; в засушливую пору яркость РП выше, чем в сырую [3, 7, 19, 22]. Вода является основной средой протекания биохимических процессов, поэтому колебания водного баланса у большинства растений без утраты жизнеспособности может происходить лишь в определенных пределах. Условия минерального питания заметно влияют на состояние растений [16, 18, 21, 35], особенно сельскохозяйственных, выращиваемых в монокультуре [5, 17]. В естественных условиях растения приспособлены к режиму питания, так как материнские породы и почвы в определенных климатических условиях являются геохимической основой формирования растительных сообществ. В этом ключе наибольший интерес представляет исследование оптических характеристик растений в целях поиска рудных и нерудных полезных ископаемых [2, 9, 14, 18, 20, 21, 29, 35, 37]. Для многих растений с рудных месторождений характерно повышение отражательной способности в видимой области и снижение ее в ИК-диапазоне [9]. Необходимо отметить, что факторы внешней среды в природе не действуют изолированно, а исключительно в комплексе друг с другом и внутренней средой растения. Определяющим является фактор, значения которого более всего отклоняются от его оптимальных для данного вида значений.

Основным внутренним фактором является процесс индивидуального развития (онтогенез), на каждом этапе которого предъявляются свои требования к количественному и качественному составу пигментов, интенсивности и направленности процессов обмена веществ, формированию и функционированию особых органов. Например, у злаковых растений максимальное количество хлорофиллов содержится в средних листьях в период, предшествующий цветению [32], тогда как у березы оно регистрируется после стабилизации роста листа [15].

Процесс онтогенеза сопровождается значительными изменениями структуры листьев, архитектоники растения, его размеров. Пластичность структуры листьев проявляет себя не только в разных условиях произрастания, но и в пределах одной особи. Например, у деревьев, растущих на опушке леса, листья, расположенные на стороне леса, имеют более мезоморфный характер по сравнению с более ксероморфными листьями открытой стороны дерева. Листья разных ярусов одних и тех же растений находятся в неодинаковых условиях водоснабжения, поскольку подъем воды связан с преодолением сопротивления (сил тяжести, трения), возрастающее с повышением высоты, на которую необходимо поднять воду. Кроме того, у растений, особенно у деревьев, верхние листья обычно находятся в особых микроклиматических условиях: усиленное освещение, нагревание, ветер, высушивание. Поэтому, как правило, верхние листья растений характеризуются более ксероморфной структурой, чем средние и нижние листья. Это справедливо для всех растений, как травянистых, так и особенно деревьев, и известно как закон Заленского [12]. Изменение структуры листа — это выражение совокупности всех изменений, которые сопровождают онтогенез растений и обусловлены метаболическими процессами, темпами и характером органообразовательной деятельности верхушечной меристемы и коррелятивными связями побега и корней [4]. Пластичность структуры листа — это в первую очередь проявление онтогенетических изменений организма, которое имеет место и во всех других органах растений, но в строении листа проявляется наиболее ярко. Наиболее контрастно

это явление выражено у представителей класса двудольных (к нему относятся все произрастающие в наших широтах древесные цветковые растения). Учет онтогенетическх особенностей при исследовании оптических характеристик листа представляется очень важным, поскольку отдельные этапы онтогенеза могут быть критическими по отношению к действию внешних факторов, вследствие чего в разные периоды жизни реакция растений на один и тот же фактор будет иной. В то же время любое внешнее воздействие тем или иным образом влияет на скорость прохождения растением этапов онтогенеза, замедляя или ускоряя его, и так или иначе отразится на структуре листа, и следовательно, на его оптических характеристиках [4, 21].

Спектральная отражательная кривая является результирующей такого взаимодействия. В обобщенном виде возрастные изменения спектрального отклика таковы: интегральная отражательная способность выше у молодых растений и ниже у находящихся в стадии полной зрелости. В конце периода вегетации наблюдается повышение отражения в видимом диапазоне, связанное с разрушением пигментов, и снижение отражения в ИК-диапазоне, очевидно, обусловленное с накоплением сухого вещества, деструктуризацией тканей и снижением их оводненности. Оптические свойства растений зависят от географического положения и экологических условий. В условиях, приближающихся к оптимальным, растения характеризуются меньшими коэффициентами отражения и более четким максимумом в зеленой зоне спектра по сравнению с растениями, находящимися в худших условиях. Сходное со старением снижение отражения в БИК-диапазоне наблюдается при заболеваниях [4, 7—9, 22].

Жизнь и отражательные свойства РП средних широт характеризуется четко выраженной сезонностью. Сезонные изменения РП могут существенно повлиять на результаты его дистанционных исследований, поскольку на разных стадиях вегетации зависимость отражательных откликов РП в отдельных диапазонах от биометрических параметров (биомассы, индекса листовой поверхности и т. д.) изменяются. Так, спектр отражения вегетирующего растения и РП в целом заметно отличается от его отклика в период цветения, когда в картину отражения вносят существенный вклад пигменты, обусловливающие окраску цветков (антоцианы, флавоноиды и др.). В связи с этим резко снижается взаимосвязь между индексами листовой поверхности и надземной биомассы, в результате чего точность оценки надземной фитомассы по данным дистанционного зондирования в видимом и БИК-диапазонах на поздних этапах вегетации уменьшается [21, 33, 34]. Контрасты в сезонном расцвечивании листвы используются для решения задач распознавания отдельных типов РП [3, 13, 15, 19]. Оптимальными сроками проведения дистанционных исследований с целью распознавания типов РП по их отражательным откликам считаются такие, когда различия типов РП максимальны: например, для хвойных и лиственных лесов это — начало и конец вегетации. Этот же подход можно использовать и для выявления участков РП, находящихся под влиянием залежи УВ. Поскольку действие факторов среды на живой организм проявляется в изменении скорости прохождения отдельных этапов онтогенеза, то есть ускоряет или замедляет переход в следующую фазу, следует предположить, что в условиях экологического пресса дистанционно регистрируется на фоне однородного РП более «молодые» (развитие замедлено) или «старые» (развитие ускорено) аномальные участки. Для своевременного выявления таких аномальных участков желательно проведение на интересуемой площади мониторинговых работ с последующим созданием банка оптических характеристик изучаемых РП в связи с периодом вегетации и состоянием РП. Эффективность распознавания состояния РП можно повысить при использовании так называемых вегетационных индексов — комбинаций отдельных спектральных параметров, что позволяет снижать уровень шумов, выявлять и усиливать контраст между отдельными оптическими диапазонами [5]. Повышение эффективности интерпретации данных дистанционного зондирования возможно при применении адекватных методов математической обработки, позволяющих работать при низких значениях информационного сигнала.

Изучение спектральных свойств растительных сообществ составляет основу разработки дистанционных методов оценки состояния РП для решения различных прикладных задач, в том числе поиска залежей УВ [2, 20, 29]. Оптические характеристики растительных сообществ целесообразно свести к определению одного параметра — спектральной отражательной способности, которая количественно выражается через альбедо и коэффициент спектральной яркости [15]. В зависимости от действия факторов среды наибольшие различия кривых отражения наблюдаются в диапазонах 550—660 нм, 660—680 нм и 800—890 нм. Дополнительная информация о состоянии РП (о типе листьев и содержании в них влаги), а также о влажности почвы может быть получена в диапазоне 1650 нм [5, 13, 15].

Растения, произрастающие в районах промышленных скоплений УВ, могут подвергаться их систематическому воздействию. Физиолого-биохимические механизмы воздействия алифатических и ароматических УВ на растения до настоящего вре-

мени в полной мере не выяснены, хотя интерес к этой проблеме проявляется наукой уже в течение столетия. Тем не менее анализ существующей по этому вопросу литературы [10, 20, 23, 31] позволяет сделать некоторые выводы относительно действия экзогенных по отношению к растениям УВ.

Углеводороды являются характерными стабильными составляющими биосферы и как одна из важных форм существования углерода занимают важное место в обмене веществом и энергией между внутренними геосферами и биосферой, между природной средой и обществом [23]. В. И. Вернадский называл газовую углеводородную составляющую одной из важнейших. Биосферные (биолитогенные, как результат биогенного синтеза из продуктов распада биомассы) и литосферные (эндолитогенные — результат природной дегазации оболочек Земли — литосферы и мантии) потоки УВ на протяжении всей истории биосферы участвовали в геохимическом цикле углерода, поддерживающем жизнь на Земле. Главным фактором образования скоплений УВ в литосфере являются эндолитогенные потоки УВ.

Алифатические предельные УВ широко распространены в растениях [23, 31]. Особенно богаты алканами листья. Алканы листьев локализованы в основном в кутикуле, однако обнаружены они и в составе липидов хлоропластов. Основным местом синтеза алканов является эпидермис. Процесс биосинтеза инициируется светом. В растениях предшественниками алканов являются соответственные жирные кислоты, а разветвленные алканы могут синтезироваться из аминокислот. Ароматические УВ синтезируются из непредельных УВ (этилена, ацетилена).

Эксперименты с применением меченых по углероду УВ показали, что способность к поглощению и усвоению УВ из окружающей среды является общим свойством высших растений. Процесс утилизации УВ у растений можно разделить на две стадии. Первая стадия охватывает первичные процессы окисления УВ вплоть до образования характерных метаболитов клетки. Следовательно, эта стадия предусматривает *частный* метаболизм молекулы экзогенного УВ и представляет собой *детоксикационный акт* растительного организма в отношении чужеродного вещества. Вторая стадия процесса — это включение С-скелета молекулы экзогенного УВ в *общий* метаболизм растительной клетки.

$$H_4C \rightarrow H_3COH \rightarrow H_2C{=}O \qquad HCOOH \rightarrow CO$$
$$\rightarrow \qquad\qquad\qquad\qquad \downarrow \qquad\quad \downarrow$$
$$\text{обмен веществ}$$

Такой ход окисления характерен для метана и других алканов. В окислении УВ активно участвуют пластиды: 30—40 % меченого углерода обнаруживается в хлоропластной фракции, около 50 % — в цитоплазматической фракции. В процессе такого окисления у растений, в отличие от микроорганизмов, для которых УВ являются источником энергии, необходимая энергия поступает из клеточных резервов, что при избытке экзогенных УВ может вызвать их истощение.

Как установлено в экспериментах *in vitro* первичные продукты окисления алканов и аренов (альдегиды и хиноны) в процессе метаболизма взаимодействуют с молекулами белков и необратимо связываются с ними. Это обстоятельство свидетельствует о возможности негативного влияния на растения, о том, что при определенных обстоятельствах УВ могут выступать в роли стрессового фактора. Ароматические УВ характеризуются значительно более высокой физиологической активностью, чем соответствующие алканы и циклоалканы. Например, бензол *in vivo* ингибирует ферментные системы растений.

Анализ литературных источников по данному вопросу свидетельствует о том, что усвоение УВ, т. е. их поглощение и утилизация, у растений находится в зависимости от сочетания ряда внешних (концентрация УВ, доступность для растения, зависящая от типа почв, температуры, освещенности, влажности и т. д.) и внутренних (состояние растения: фаза развития, состояние здоровья, обусловленное наличием или отсутствием инфекций, иного поражения, степень врожденной способности к усвоению УВ) факторов. Как правило, «буферная емкость» растительной клетки достаточно высока, поэтому растения в природных условиях обычно достаточно хорошо переносят УВ.

В зависимости от интенсивности процессов энергомасопереноса от залежи УВ можно виделить два основных типа реализации проявления влияния залежей УВ на «живое вещество». Первый из них связан с природными выходами УВ на поверхность Земли. В таких условиях УВ представляют собой доминирующий фактор влияния залежей УВ. Газоподобные УВ могут замещать кислород почвенного воздуха, непосредственно формируя тем самым неблагоприятные условия для дыхания корневой системы высших растений (хвойных, цветковых), в результате чего нарушается поглощение воды и минеральных веществ. Все это приводит к угнетению жизнедеятельности растений вплоть до их гибели. Жидкие УВ в значительных концентрациях фактически изолируют корневую систему от окружающей ее почвы, также в конечном итоге вызывая угнетение и гибель растений. Сопутствующие газоподобные и пароподобные элементы флюидного потока, например, Hg, H_2S и другие, в незначительных дозах также могут непосредственно отравляюще действовать на ферментные системы расте-

ний. Кроме того, в таких условиях должна страдать не только корневая система растений, но и их надземная часть, поскольку в приземном атмосферном слое концентрации данных веществ также будут значительно повышены. Важно отметить, что отдельные виды растений различаются между собою по степени чувствительности к влиянию данного фактора. Так, клен канадский проявляет повышенную устойчивость к просачиванию метана по сравнению с дубом, что приводит до постепенного замещения со временем дубов кленами в зонах природных выходов УВ на некоторых территориях Канады [20]. У растений, которые произрастают в условиях избытка УВ в почвах, когда детоксикационные процессы не компенсируются физиологическими возможностями организма, то есть в стрессовой ситуации, происходят изменения как на уровне фенотипа, так и на генетическом уровне. На фенотипическом уровне отмечены угнетение роста, подвядание, изменения окраски листьев, ориентации в пространстве побегов и листьев. Такие изменения зарегистрированы, к примеру, у шалфея, произрастающего в местах непосредственного выхода УВ [20]. У канареечника тростниковидного на генетическом уровне выявлены изменения структуры популяционной изменчивости признака «длина проростка» под влиянием жидких УВ в среде выращивания [6, 30].

Второй тип проявления влияния залежей УВ на макро- и микробиоту можно охарактеризовать как опосредованный. Граница между двумя типами достаточно условна и определяется главным образом значениями концентрации мигрирующих флюидов, преимущественно УВ. Поэтому влияние на биоту залежи УВ в данном случае является результатом сложного взаимодействия всех перечисленных выше полей. В свою очередь, интенсивность процессов энергомассопереноса от залежей УВ зависит от ландшафтных процессов литолого-геохимических условий верхнего слоя осадочного чехла [10, 29]. В условиях разуплотнения пород, где преобладают фильтрационные процессы массопереноса флюидов (и где важную роль играют УВ), бактериальный фильтр обусловливает накопление в почвах металлорганических соединений, содержащих гидроксильные и аминогруппы. Преобладание интенсивности потока УВ над поглощающей способностью УВ — окисляющей микрофлоры приводит к появлению качественно новых физико-химических условий (восстановительные условия), за счет чего поливалентные металлы (Co, Cr, V, Fe и др.) становятся более подвижными и более доступными для поглощения растениями. Бактериальный фильтр в условиях, где преобладает диффузионный массоперенос флюидов, приводит к повышению. щелочности почвенных растворов, накоплению вторичных карбонатов, перераспределению породообразующих оксидов. Так формируются специфические условия минерального питания.

Особое место в комплексе влияния указанных выше полей принадлежит температурному фактору — температурным аномалиям, которые регистрируются над залежами УВ и флюидопроводящими зонами новейшей тектонической активности и разуплотнения горных пород [18]. Зарегистрированные значения колебаний температуры (в условиях ДДВ диапазон колебаний находится в пределах −2.6 °С—+4.5 °С), позволяют считать данный фактор одним из важнейших факторов влияния залежи УВ на процессы роста высших растений и микрофлоры, поскольку от него прямо и косвенно зависит скорость физических (растворение, адсорбция газов, паров и др.), химических (окисления и восстановления УВ и иных химических соединений) и биохимических обменных процессов: фотосинтеза, дыхания, транспорта воды, питательных веществ и продуктов обмена.

Воздействие на растительность аномальных процессов и полей в пределах зон интенсивной вертикальной миграции пластовых и глубинных флюидов визуально зарегистрированы в районе Новотроицкого нефтегазоконденсатного месторождения [26]. Аномальное состояние сосен выражается в интенсивном проявлении процессов деформирования стволов деревьев, характере их ветвления, отмечен значительный процент погибших деревьев.

Необходимо подчеркнуть, что признаки подвядания, изменение окраски листьев и побегов, изменение ориентации фитоэлементов в пространстве, то есть внешние признаки проявления прямого стрессового влияния залежей УВ и сопутствующих флюидов на процессы жизнедеятельности растений могут быть зарегистрированы наземными и аэрокосмическими методами в видимом и инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения. В случае влияния залежей УВ второго типа (опосредованного) растения, произрастающие на данной территории, приспособлены к данным условиям. Анатомо-морфологические и физиолого-биохимические различия между растениями с фоновых участков и растущих в пределах залежи УВ могут быть менее значительными в сравнении с реакцией на непосредственное действие УВ. В то же время при наличии современных технологий существует реальная возможность регистрации и анализа этих различий физиологического состояния растений оптическими методами [2, 26, 29].

Таким образом, полученные дистанционными методами характеристики отражения РП в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного излучения несут в себе комплексную информацию о состоянии РП: о качестве и количестве пигментов,

структуре листвы, геометрии и плотности составляющих РП, условиях жизни. Наиболее информативными для получения сведений о состоянии РП являются диапазоны спектра отражения, в которых у растений, находящихся в разных условиях, наблюдаются максимальные различия: 550—660 нм, 660—680 нм, 800—890 нм, 1650 нм. Выбор времени исследований диктуется поставленной задачей. Точность интерпретации дистанционных результатов и прогноз развития ситуации существенно повышаются при использовании априорной и синхронной наземной информации.

Анализируя приведенные факты, необходимо признать наличие сложной непрямой связи между аномалией УВ в приповерхностном слое, обусловленной процессами миграции из залежи УВ, и растениями в пределах такой аномалии. Физико-химические процессы преобразования почв вследствие миграции флюидов (УВ и других), развитие специфической микрофлоры, отличный от фонового температурный режим и прочие, как прямо, так и опосредованно влияют на формирование флоры, которая состоит как из аллохтонных так и автохтонных видов и разновидностей, адаптированных к аномальным условиям окружающей среды, и находящихся в состоянии адаптации.

Аномалии растительности (флоры) в пределах геохимических аномалий, обусловленных залежами УВ, могут дублировать аномальные флоры, например, такие, что сформировались на полиметаллических месторождениях, поскольку доступность отдельных металлов в почвах в обоих случаях изменяются [16, 21]. Многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что нет однозначной зависимости между наличием, доступностью металлов и их содержанием в корнеобитаемом слое и разных частях растений. Более того, есть много механизмов адаптации к такого роду воздействию, выявлена схожесть признаков реакции на геохимическую аномалию и реакций на прочие стрессы и аномалии [16, 19, 21, 38]. Все это справедливо и для действия других факторов среды. Аналогичная ситуация отмечается и в отношении отражательных характеристик растений при воздействии стрессовых факторов [14, 16, 21, 36, 37].

Следует признать, что в лабораторных условиях невозможно смоделировать бесчисленные вариации природных условий для целей выработки однозначных алгоритмов определения какого-либо фактора по дистанционно полученным спектральным откликам растительных объектов, в связи с чем каждый натурный эксперимент является по сути уникальным и требует собственного наземного обеспечении, Однако тенденции развития оптических аппаратурных средств и технологий дистанционного зондирования для фитодиагностики заключаются во все большем приближении их к уровню информативности лабораторных исследований.

1. Алексеев В. А. Световой режим леса. — Л.: Наука, 1975.—227 с.
2. Архипов А. И., Перерва В. М., Левчик Е. И. и др. Оптичні аномалії рослинності як індикатор покладів вуглеводнів // Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології. — Київ, 2000.—С. 52—57.
3. Бранд А. Б., Тагеева С. В. Оптические параметры растительных организмов. — М.: Наука, 1967.—301 с.
4. Василевская В. К., Антонова И. С. К вопросу о пластичности строения листа // Вопросы экологической анатомии и физиологии растений: Тр. Петергофского биол. ин-та. — Л.: ЛГУ, 1978.—№ 27.—С. 5—20.
5. Выгодская Н. Н., Горшкова Н. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. — Л.: Недра, 1987.—248 с.
6. Глотов Н. В., Максименко О. Е., Орлинский Д. Б. Эколого-генетическая изменчивость клевера белого (Triofilium repens L) в природных популяциях Среднего Приобья // Экология.—1995.—№ 5.—С. 344—346.
7. Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Ф. Свейна, Ш. Дейвиса. — М.: Мир, 1983.—415 с.
8. Ефременко В. В., Мошков А. В., Семенов А. А. и др. Метод выявления угнетенной растительности по данным спектрозонального сканера // Исслед. Земли из космоса.—1997.—№ 6.—С. 3—9.
9. Жуков Б. С. Физические основы дистанционного зондирования // Итоги науки и техники. Сер. Исслед. Земли из космоса.-1987.-1.—С. 6—78.
10. Журавель Н. Е., Васильев А. Н. Закономерности формирования аномальных концентраций металла в почвенно-растительном покрове Шебелинского месторождения // ДАН УССР. Сер. Б. Геол., хим. и биол. науки.—1987.—№ 3.—С. 14—17.
11. Зорькин Л. М., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. и др. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцевых геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле // Открытие от 24.07.80, № 234.
12. Заленский В. Р. Материалы к количественной анатомии различных листьев одних и тех же растений // Изв. Киев. политехн. ин-та.—1904.—4, Вып. 1.—214 с.
13. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М.: Изд—во АН СССР, 1947.—271 с.
14. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988.—349 с.
15. Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Федченко П. П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.—229 с.
16. Косицин А. В., Алексеева-Попова Н. В. Действие тяжелых металлов на растения и механизмы металлоустойчивости // Растения в условиях экстремального минерального питания. — Л.: 1983.—С. 5—22.
17. Кочубей С. Н., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — К.: Наук. думка, 1990.—136 с.
18. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д, Жарый В. Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. — К.: Наук. думка, 1992.—204 с.
19. Мелешко К. Е. Спектрофотометрические исследования природных покровов Земли. Стандартизация методики измерения и обработки. — Л. Недра, 1976.—112 с.
20. Михайлов А. В., Саблина И. Ю. Миграция углеводородов и

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 197—200

возможности установления отражения их ареалов в ландшафте аэрокосмическими методами // Прогнозирование структур осадочного чехла на основе комплексной интерпретации и обработки на ЭВМ аэрокосмических и геолого-геофизических данных. — М., 1990.—С. 21—33.
21. Мовчан Л. И., Каневский В. А., Семичаевский В. Д. и др. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. — К.: Наук. думка, 1993.—305 с.
22. Обиралов А. И. Дешифрирование снимков для целей сельского хозяйства. — М.: Недра, 1982.—145 с.
23. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. — М.: Изд-во Моск.ун-та, 1993.—208 с.
24. Перерва В. М. Вероятная природа линеаментов, выявляемых аэрокосмическими методами backslash // Геол. журн.—1999.—№ 1.—С. 66—76.
25. Перерва В. М. Спутниковая информация в изучении флюидопроводящих структур литосферы // Космічна наука і технологія.—1998.—**4**, № 2/3.—С. 126—132.
26. Перерва В. М., Архипов А. И. Явление аномального изменения физиологии растений в зоне флюидогеодинамических структур литосферы // Доп. НАН України.—1999.—№ 10.—С. 111—114.
27. Перерва В. М. Геоинформационный уровень ландшафтов в изучении геофлюидодинамических структур литосферы дистанционными методами // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—2000.—**1**, № 9.
28. Перерва В. М. Геофлюидодинамические структуры литосферы и современные ландшафты // Український географ. журн.—2000.—№ 4.—С. 12—18.
29. Перерва В. М., Архипов А. И., Левчик Е И. и др. Аэрокосмические исследования в решении нефтегазогеологической супер-задачи — прямом поиске залежей углеводородов // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—1999.—**2**, № 7.—С. 67—71.
30. Семириков Л. Ф., Завьялова Н. С. Влияние нефтяных загрязнений на изменчивость популяции канареечника тростниковидного (Phalasoides arundinacea) // Экология.—1990.—№ 2.—С. 31—34.
31. Угрехелидзе Д. Ш. Метаболизм экзогенных алканов и ароматических углеводородов в растениях. — Тбилиси: Мецниерба, 1976.—222 с.
32 Шульгин И. А. Морфологические приспособления растений к свету. — М.: Изд-во МГУ, 1963.—74 с.
33. Allen W. A., Gausman H. W., Richardson F. J. Willstatter — Stoy theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing // Appl. Opt.—1973.—N 12.—P. 2448—2454.
34. Gausman H. W., Cardenas R. Light reflectance by leaflets of pubescent, normal and glabrous soebeen lines // Agron. J.—1973.—**65**, N 7.—P. 837—838.
35. Goetz A. F. H., Rowan L. C. Geologic remote sensing // Science.—1981.—**211**, N 4484.—P. 781-=791.
36. Grant L. Diffuse and spectral characteristics of leaf reflection // Remote Sens. Environ.—1987.—**22**, N 2.—P. 309—322.
37. Labovitz M. L., Masuoka E. J., Bell R., et al. The application of remote sensing to geobotanical exploration for metal sulfides — results from the 1980 field season at Mineral // Econ. Geol.—1983.—**78**, N 4.—P. 750—760.

Прогнозирование зон развития вторичных коллекторов по спутниковым данным

В. М. Перерва, Т. И. Костина

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Геологическая и экономическая эффективность процессов поиска, разведки и, в особенности, разработки месторождений многих полезных ископаемых связаны с характером коллекторских свойств вмещающих пород и продуктивных горизонтов (месторождения нефти и газа, рудных полезных ископаемых, термальных, бальнеологических, питьевых и минеральных вод, алмазов и некоторые другие). При решении многих инженерно-геологических задач информация о зонах развития процессов разуплотнения пород, их вторичных изменениях, миграции по таким зонам пластовых и глубинных флюидов, как жидких, так и газообразных, нередко имеет первостепенное значение. Указанные зоны часто играют роль участков локализации процессов разрядки геодинамических напряжений в литосфере и поэтому представляют нередко серьезную сейсмическую опасность. Одним словом, речь идет об изучении весьма важных геологических процессов и формируемых ими структур в теле литосфере.

Попытки создания методов эффективного изучения зон разуплотнения и развития вторичных высокопроницаемых коллекторов предпринимались ранее, предпринимаются и сейчас. Пожалуй, главным из направлений создания таких методов следует назвать геофизическое. К сожалению, приходится констатировать, что до настоящего времени такой методики этого направления нет. Попытки решать задачу сейсмическими методами, методами высокоточной гравиметрии и магнитометрии, по крайней мере в пределах нефтегазоносных территорий, не дали ощутимого положительного результата. Так, попытки заложения эксплуатационных скважин с ожидаемыми удовлетворительными суточными дебитами на Чернетчинско-Хухринском нефтяном месторождении по геофизическим данным не увенчались успехом, что в конечном итоге поставило в трудное положение сам процесс разра-

© В. М. ПЕРЕРВА, Т. И. КОСТИНА, 2002

ботки месторождения ввиду его низкой эффективности. По всей видимости, тот же самый результат будет получен по площади Гашиновской, начало поисковых работ на которой ознаменовалось получением мощного притока углеводородов (УВ) в скважине № 1 (264 $м^3$/сут), послужившего поводом очередной эйфории относительно высокого прогнозируемого углеводородного потенциала кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Причиной такого положения, без сомнения, станет факт отсутствия уверенной методики прогнозирования вторичных коллекторов и заложения как поисково-разведочных, так и в особенности эксплуатационных скважин без учета информации о развитии зон разуплотнения (вторичных высокопроницаемых коллекторов).

В отделе аэрокосмических исследований в геологии Центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины в последние годы также выполняются исследования по решению рассматриваемой проблемы. Исследования проводились применительно к ландшафтным и геологическим условиям Западно-Сибирской плиты и Днепровско-Донецкой впадины. По итогам исследований к концу 1998 г. была создана спутниковая технология изучения зон развития вторичных коллекторов, позволяющая проводить дифференциацию изучаемых площадей по степени проявления процессов разуплотнения пород.

Основу указанной спутниковой технологии составляет учение о так называемых геофлюидодинамических структурах литосферы (ГФДС) [1—4]. Имеющиеся к настоящему времени данные, полученные на основе аэрокосмических и геолого-геофизических исследований, позволяют сформулировать следующую модель их формирования и строения. Формирование ГФДС, как своеобразных структур литосферы, связывается с узлами пересечения вертикальных (субвертикальных) зон напряженно-деформированного состояния литосферы (ВЗНДС). Хотя природа этих образований во многом все еще остается не познанной, тем не менее их сущность в общем виде вырисовывается достаточно однозначно. Проекцией на земную поверхность (следом) ВЗНДС являются прямолинейные зоны, дешифрируемыми на материалах аэрокосмических съемок как линеаменты.

Важнейшие свойства ВЗНДС, такие как прямолинейность следа на земной поверхности, большая протяженность этого следа, имеющего для низкоранговых линеаментов трансконтинентальный характер, отсутствие связи линеаментов с основными тектоническими зонами, закономерный характер развития линеаментов и другие, связаны с воздействием на Землю космогенных факторов [5—10], что, очевидно, и определяет планетарный характер их развития. В зависимости от ранговой принадлежности ширина ВЗНДС на материалах космических съемок колеблется от 0.2 до 10—15 км.

В пределах ГФДС геофизические, геохимические и биохимические поля имеют, как правило, аномальный характер, что составляет физическую основу аномального изменения физико-химических и оптических свойств ландшафтов. Этот факт обеспечивает уверенное картирование ГФДС аэрокосмическими методами, которые в настоящее время являются по сути единственными в их эффективном изучении. Размеры ГФДС зависят от ширины формирующих их ВЗНДС и варьируют от 1 до 200 км (возможно и более). Структура ГФДС имеет ярко выраженный гетерогенный характер, заключающийся в чередовании участков низкой и высокой проницаемости. Последние как элементарные образования ГФДС названы нами очагами разуплотнения. Их размеры 300—400 м в поперечнике. Собственно с изучением очагов разуплотнения, а не только в целом ГФДС, решается задача уверенного заложения высокодебитной скважины.

В формировании вторичных коллекторов, обладающих высокими фильтрационно-емкостными свойствами, принимают участие процессы тектонического разуплотнения и гидротермальных изменений пород под воздействием мигрирующих по зоне ГФДС гидротермальных растворов (замещение, выщелачивание). Причем, нередко процессы гидротермальных изменений пород играют наибольшую роль в формировании природного резервуара в сравнении с тектоническим фактором. Наиболее эффективно процессы гидротермальных изменений пород протекают при оптимальном соотношении физико-химических свойств гидротермальных растворов и петрофизических свойств вмещающих пород, следствием которого является формирование достаточно емких пустотных пространств (каверн, пустот). С такими условиями связаны наиболее высокие притоки пластового флюида и наиболее большие объемы накопленной добычи (от 500 т в сутки на некоторых месторождениях Западной Сибири, до 1000 т в сутки и более по ряду месторождений Ирана, Ирака).

Интенсивность и характер физико-химических процессов, развивающихся в пределах ГФДС в зоне фундамент — земная поверхность, обеспечивает высокий информационный уровень полезного сигнала, заключенного в спектральных характеристиках компонентов ландшафта и регистрируемого съемочными аэрокосмическими устройствами. Характер информации позволяет судить о пространственном размещении зон высокоемких коллекторов и интенсивности процессов разуплотнения.

Эффективность исследований связана с выбором оптимальных параметров съемки (сезона, времени

суток, разрешающей способности, как спектральной, так и геометрической, съемочного устройства, комплекса спектральных диапазонов съемки), а также программ компьютерной обработки спутниковой информации.

Говоря о сезоне съемки, нельзя не упомянуть о весьма интересном факте. На начальном этапе исследований, скорее по инерции подхода к методике аэрокосмогеологических исследований, чем в соответствии со строгими требованиями теоретической модели, анализу подверглись лишь материалы съемок летнего периода. Однако последующий анализ материалов весеннего сезона показал, что участки наиболее раннего схода снежного покрова связаны с ГФДС. Этот процесс обусловлен аномальным состоянием теплового поля в зоне ГФДС. Но этот признак, к сожалению, указывает лишь на общее положение ГФДС, не давая информации о его важном элементе — очаге разуплотнения, представляющего предмет анализа в прогнозировании зон разуплотнения.

Наиболее информативными видами аэрокосмических съемок являются фотографическая интегральная, спектрозональная, а также многозональная съемка (диапазон 0.4—0.5 мкм).

Могла бы быть весьма информативной тепловая съемка, но для этой цели регистрирующие системы должны обладать высоким пространственным разрешением (не хуже 200 м).

В летнем сезоне наиболее информативными для ландшафтных и климатических условий Днепровско-Донецкой впадины являются материалы аэрокосмических съемок, выполненных в июле — августе. Это обстоятельство связано с наиболее благоприятными в этот период фазами вегетации древесной и травяной растительности, формированием наиболее ярких спектральных контрастов между фоном и ГФДС. Наибольшая трудность в изучении ГФДС создается в том случае, когда территория (поисковая площадь, участок, месторождение) представлена разнородными растительными фациями, в особенности если эти фации характеризуются значительными спектральными различиями.

Апробация спутниковой технологии к настоящему времени в производственном режиме выполнена на месторождениях Западной Сибири и Днепровско-Донецкой впадины. В Днепровско-Донецкой впадине апробация выполнена на Чернетчинско-Хухринском месторождении. На этом месторождении выполнялся опережающий испытание эксплуатационных скважин прогноз геодинамической ситуации, к которой соотносился ожидаемый суточный приток пластового флюида. Коэффициент подтверждаемости результатов прогноза, выполненного по 10 скважинам, составил 0.84.

В Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции апробация выполнена на площадях Каменной и Талинской. На площади Каменной с учетом результатов прогноза вторичных коллекторов пробурена одна скважина. При фоновых значениях суточных дебитов, равных в среднем 1—2 т, суточный дебит скважины, пробуренной по результатам прогноза, составил более 50 т. Как видно, на этой площади первая же пробуренная скважина подтвердила данные прогноза. На площади Талинской апробация носит более масштабный характер (рисунок). По результатам прогноза здесь пробурено 28 эксплуатационных скважин. Испытаниям подвергнуты продуктивные горизонты $ЮК_{10}$ и $ЮК_{11}$, залегающих в подошве тюменской свиты (горизонт $ЮК_{11}$ залегает на образованиях кристаллического фундамента). Это обстоятельство обеспечило наи-

Рис. 2. Результаты апробации методики прогноза вторичных коллекторов на площади Талинской (Западно-Сибирская НГП). Зоны развития вторичных коллекторов по степени проявления процессов разуплотнения пород: 1 — до 159 $м^3$/сут, 2 — до 100 $м^3$/сут, 3 — до 30 $м^3$/сут; 4 — номер скважины и суточный дебит пластового флюида

более полное по сравнению с вышележащими горизонтами свиты проработку пород гидротермальными растворами в зоне ГФДС. На этой площади, если вне зоны разуплотнения суточный дебит в среднем составляет 10 т, то в зоне ГФДС он достигает практически 200 т, и, что не менее существенно, по сравнению с фоновыми скважинами в зоне ГФДС скважины работают фонтанным способом. Подтверждаемость прогноза по 28 эксплуатационным скважинам составила 85 %.

Наибольшим затрудняющим фактором в условиях болотно-таежных ландшафтов Западной Сибири является высокая степень их гидроморфности, в которых ландшафтные признаки ГФДС и в особенности их составных элементов — очагов разуплотнения в значительной мере вуализируется. Это требует применения специальных приемов обработки исходной космической информации.

Как видно из приведенных данных результатов апробации, разрабатываемая спутниковая технология эффективна как в геологическом, так и в экономическом отношении и является очень оперативной. Так, затраты по изучению одного квадратного километра исследуемой территории составляют 1000—1500 грн, а время исследований по одной осредненной нефтегазопоисковой площади составляет 8—10 месяцев, в экстренных случаях оперативное заключение по одной площади может быть подготовлено за 2—3 месяца.

Внедрение спутниковой технологии в производственном режиме при опоисковании перспективных нефтегазопоисковых объектов и разработке залежей УВ в кристаллическом фундаменте Днепровско-Донецкой впадины послужит фактором успешности ввода промышленных скоплений УВ в разработку и, что наиболее существенно, фактором рентабельности разработки этих месторождений. Анализ эффективности, проведенной более чем по 500 скважинам месторождений Западной Сибири, показал, что количество высокодебитных скважин, пробуренных «вслепую», без учета информации о размещении зон высокопроницаемых коллекторов, не превышает 25 %, т. е. из четырех пробуренных скважин лишь по одной затраты являются оправданными. В этой ситуации нужно обратить внимание еще на одно важное обстоятельство. Природные резервуары кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины характеризуются преимущественно небольшими размерами, поэтому в условиях соотношения высокопродуктивных и низкопродуктивных (или же «сухих») скважин 1:4 без использования технологии прогноза коллекторов приведет (и вероятно уже приводит) к пропуску залежей, приуроченных к резервуарам указанного типа. Поэтому, не вдаваясь в дискуссию о проблематике промышленной нефтегазоносности кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины, отметим лишь, что без прогноза зон развития вторичных коллекторов задачу оценки промышленной нефтегазоносности указанных объектов и разработки залежей не решить.

Перспективы дальнейших исследований по рассматриваемому направлению связываются с совершенствованием спутниковой технологии прогнозирования высокопроницаемых коллекторов, более широкого внедрения этой технологии в подразделения топливно-энергетического комплекса Украины, апробации технологии в более широком спектре ландшафтных и геологических условий нефтегазоносных территорий.

Совершенствование технологии предусматривает перевод всего процесса изучения зон развития вторичных коллекторов по спутниковым данным в автоматизированный режим, доработки рационального комплекса видов съемки, сезона и спектральных диапазонов.

Внедрение спутниковой технологии изучения зон развития вторичных коллекторов в практику поиска, разведки, и что наиболее существенно, разработки месторождений нефти и газа позволит ускорить и удешевить ввод в промышленную разработку тех месторождений, формирование природных резервуаров в которых связано с процессами разуплотнения пород.

1. Перерва В. М. Вероятная природа линеаментов, выявляемых аэрокосмическими методами backslash // Геол. журн.—1999.—№ 1.—С. 66—76.
2. Перерва В. М. Спутниковая информация в изучении флюидопроводящих структур литосферы // Космічна наука і технологія.—1998.—**4**, № 2/3.—С. 126—132.
3. Перерва В. М. Геоинформационный уровень ландшафтов в изучении геофлюидодинамических структур литосферы дистанционными методами // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—2000.—**1**, № 9.—С. *55*—60.
4. Перерва В. М. Геофлюидодинамические структуры литосферы и современные ландшафты backslash // Український географ. журн.—2000.—№ 4.—С. 12—18.
5. Афанасьев Н. С., Башилов В. И., Брюханов В. Н. и др. Космогеология СССР. — М.: Недра, 1987.—240 с.
6. Баренбаум А. А. Роль космогенного фактора в геодинамике // Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные): Тез. докл. Первого междунар. семинара (Москва, сентябрь, 1994). — М., 1994.—С. 13.
7. Белов Н. И. О природе горизонтальных напряжений и влиянии космических факторов на реализацию горных ударов и землетрясений // Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные): Тез. докл. Первого междунар. семинара (Москва, сентябрь, 1994). — М., 1994.—С. 17—18.
8. Буш В. А. Система трансконтинентальных разломов Евразии // Геотектоника.—1983.—№ 3.—С. 15—31.
9. Тяпкин К. Ф. Физика Земли: Учебник. — К.: Вища шк., 1998.—312 с.
10. Чебаненко И. И. Теоретические аспекты тектонической делимости земной коры (на примере Украины). — Киев: Наук. думка, 1977.—84 с.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 201—206

Состояние и пути совершенствования спутниковой технологии прогнозирования залежей нефти и газа

В. М. Перерва, А. И. Архипов, Г. Ф. Бусел, Е. И. Левчик, Е. А. Рыбак, Т. В. Осканьян

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Разработка прогрессивных методов и технологий для нужд различных отраслей производства является наряду с фундаментальными исследованиями одним из приоритетных направлений современной науки. Особо важное значение в сложившейся в Украине экономической ситуации имеет оперативное внедрение в практику геологоразведочных работ новейших методов поиска, разведки и разработки месторождений, базирующихся на последних достижениях науки и техники. К таким методам относятся, в частности, космоаэрометоды. Опыт мировой и отечественной практики показал, что применение космоаэрометодов существенно повышает эффективность геологоразведочных работ на нефть и газ. Основными геологическими задачами, решаемыми до недавнего времени в производственном режиме, являлись изучение разрывных нарушений, блоковых полей и оценка их неотектонической активности, выявление локальных неотектонических аномалий, с которыми связаны нефтегазопоисковые объекты различных морфогенетических типов, а также некоторые другие задачи [1].

На протяжении более десяти лет в Центре аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины развивается новое научное направление для решения нефтегазопоисковых задач в различных ландшафтных и геологических условиях. В настоящее время данные исследования доведены до стадии практической реализации — создана оригинальная, не имеющая мировых аналогов спутниковая технология поиска залежей нефти и газа на суше. Технология является результатом совместных усилий профессиональных геологов-нефтяников, физиков-оптиков, биологов, геоморфологов, математиков и других специалистов. На расширенном заседании Президиума НАН Украины 07.07.99 г. с участием представителей Министерств и предприятий ТЭК Украины спутниковая технология получила высокую оценку и включена в перечень завершенных НТР «НАН Украины — топливно-энергетическому комплексу» за 1999 год. Технология прошла апробацию в условиях Западно-Сибирской и Волго-Уральской НГП. С 1994 г. работы проводятся в условиях Днепровско-Донецкой впадины (Украина).

Научные исследования по созданию спутниковой технологии прогнозирования залежей УВ на суше по инициативе и под научным руководством В. М. Перервы были начаты сотрудниками Киевского отдела Института геологии и разработки горючих ископаемых (ныне ЦАКИЗ) Н. А. Тепляковым и Г. Ф. Буселом в конце 1980-х годов. Впоследствии активное участие в разработке основ технологии приняли сотрудники отдела аэрокосмических исследований в геологии А. И. Архипов, Е. И. Левчик, З. М. Товстюк, А. В. Гонтаренко, А. Н. Иванисов, А. В. Перекрест, Е. А. Рыбак, Т. В. Осканьян. Результаты исследований опубликованы более чем в 20 научных работах, а также в отчетах.

В основе предлагаемой технологии лежат методы получения, обработки и анализа оптических характеристик растительного покрова (РП) по результатам дистанционных и наземных фотометрирований с целью решения различных нефтегазопоисковых задач. Выбор РП как носителя информации о наличии залежи УВ обусловлен тем, что 2/3 поверхности суши покрыто растительностью: 42 % занимают леса, 24 % — районы лугов и пастбищ, 21 % — кустарники пустынь и травянистый покров полузасушливых земель. Поскольку освоенные районы разведаны более тщательно, следует полагать, что большая часть неразведанных месторождений мира, рентабельных с экономической точки зрения, вероятно, находится на территориях, покрытых растительностью [2].

Важным достоинством предлагаемой технологии является ориентация на количественную оценку изменения оптических характеристик растительно-

© В. М. ПЕРЕРВА, А. И. АРХИПОВ, Г. Ф. БУСЕЛ, Е. И. ЛЕВЧИК, Е. А. РЫБАК, Т. В. ОСКАНЬЯН, 2002

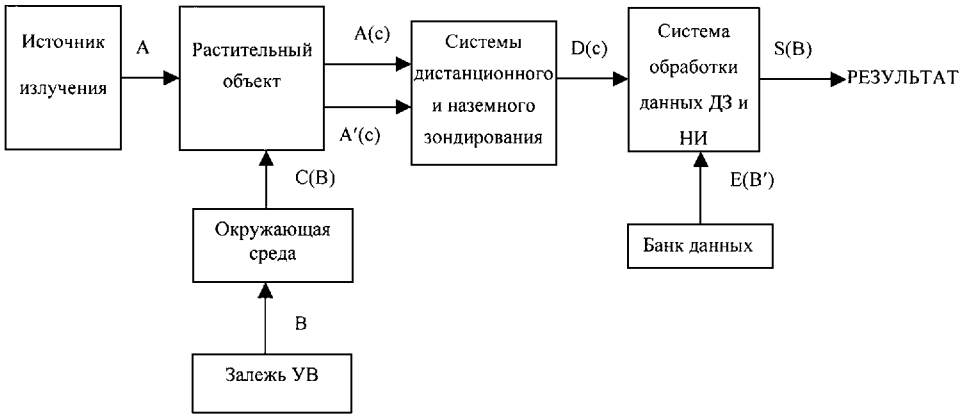


Рис. 1. Модель регистрации оптической аномалии, обусловленной залежью УВ

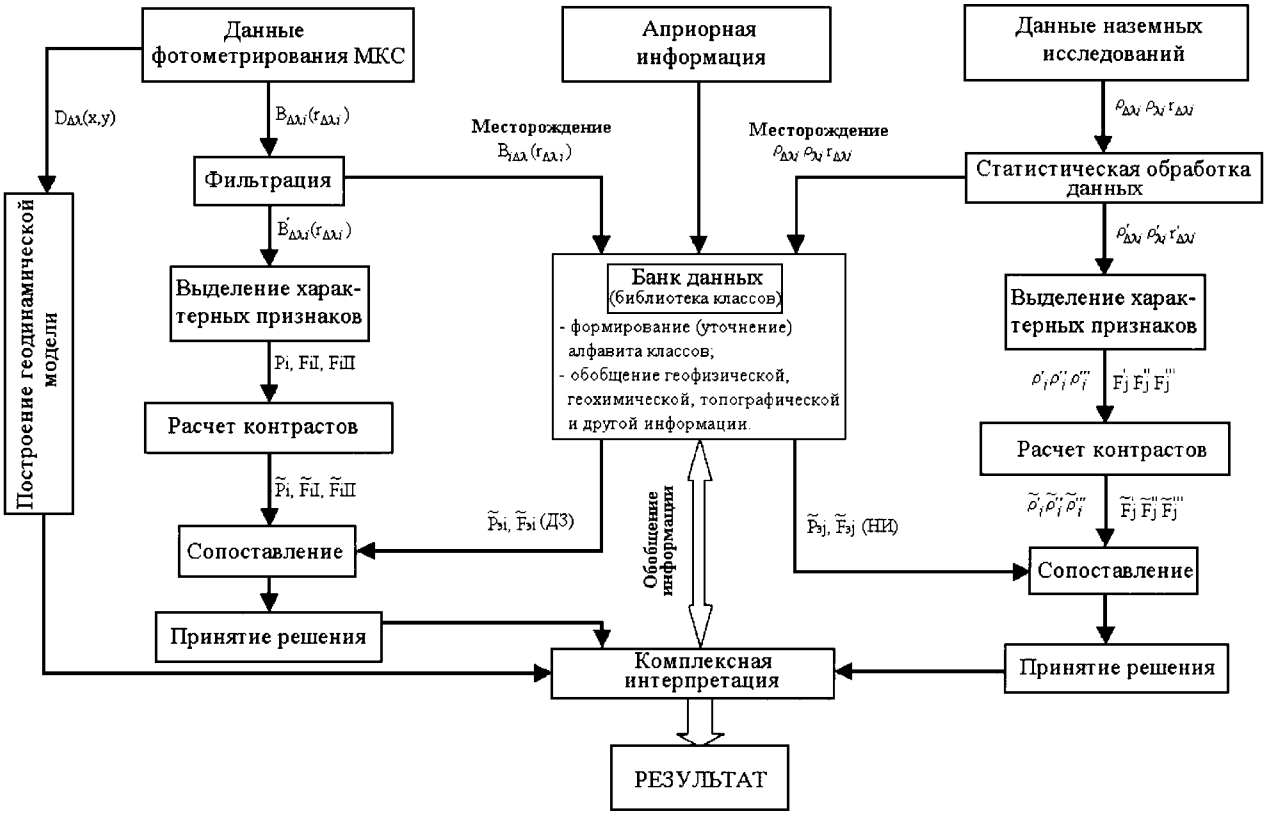


Рис. 2. Технология обработки результатов дистанционных и наземных фотометрирований с целью выявления оптических аномалий

сти над залежами УВ, что в значительной степени позволяет исключить субъективный фактор на различных этапах исследований, а также использовать возможности компьютерных технологий и современного математического аппарата.

Теоретические предпосылки исследований базируются на таких положениях:

— физиологическое состояние растений и их оптические характеристики определяются совокупностью факторов окружающей среды [2, 3]. Такими факторами являются аномальные геологические, геофизические, геохимические и биохимические поля над залежами УВ [4];

— изменение оптических характеристик расте-

ний может быть зарегистрировано аэрокосмическими и наземными методами [2, 3].

Растения и РП в целом в системе дистанционной индикации выступают в роли чувствительных элементов и одновременно биоусилителей, так как они могут реагировать на незначительное влияние разных факторов среды благодаря кумулятивному эффекту [3]. Процесс регистрации полезного сигнала, обусловленного наличием залежи УВ представляется схемой на рис. 1.

Известно, что поток излучения [A], достигая ландшафта (РП), частично поглощается, а частично отражается A(C) зеркально и диффузно. Кроме того, часть поглощенной энергии (до 6 %) переизлучается A′(C′) — явление флуоресценции. Таким образом, потоки излучения на входе системы дистанционного зондирования A(C), A′(C′) оказываются модулированными. Модулятором является РП, физиологическое состояние которого, а следовательно, и его оптические параметры, определяется совокупностью факторов внешней среды [C(B)]. Над залежью УВ доминирующими факторами являются аномальные поля, формирование которых индуцирует сама залежь УВ. (Здесь не рассматриваются теоретические аспекты, связанные с влиянием атмосферы на падающий и отраженный потоки излучения, физические закономерности взаимодействия электромагнитного излучения с РП, а также конкретные изменения физиологических характеристик растений над залежами УВ). В процессе дистанционного и наземного зондирования осуществляется фотометрирование РП или его элементов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Результатом замеров является совокупность числовых значений, характеризующих состояние РП и его элементов в каждой точке фотометрирования D(C).

Необходимо подчеркнуть, что при многозональной съемке появляется дополнительный опознавательный признак исследуемых объектов — распределение их яркости. Чем уже зоны спектра и, соответственно, чем большее число их используется при съемке, тем более тонкая спектральная структура наблюдаемого поля яркости регистрируется многозональной камерой и тем большее число объектов или их состояний можно отличить друг от друга по спектральному признаку [5]. Известно, что наиболее часто основная информация об объекте заключена не в отдельных признаках, а в их различных сочетаниях [6].

Заключительным этапом решения нефтегазопоисковых задач является обработка данных фотометрирования D(C) с широким использованием материалов, накопленных за время исследований в банке данных по эталонным объектам, которые изучались в различных геологических и ландшафтных условиях E(B′). Технологию обработки см. на рис. 2.

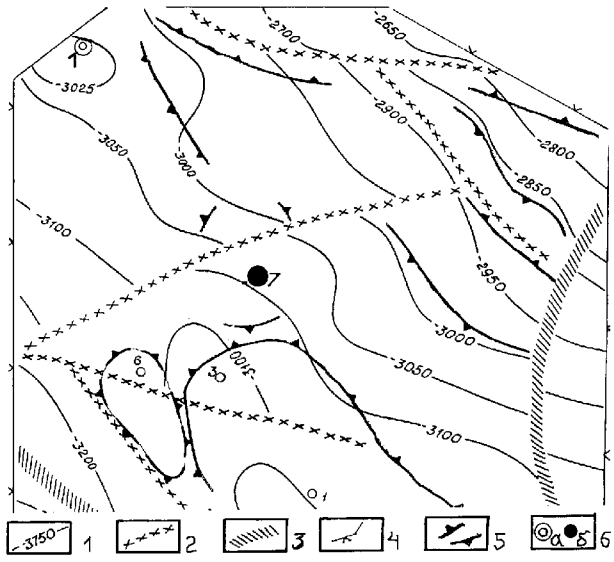


Рис. 3. Результаты апробации спутниковой технологии прогноза залежей нефти на площади Митяевской. Условные обозначения: 1 — изогипсы по отражающему горизонту $V_{в2-п}$ (C_1V_2); 2 — локальные разрывные нарушения; 3 — разломы; 4 — контур района проведения исследований; 5 — оптическая аномалия; 6 — скважины, пробуренные после выявления аномалий: а — № 1 за пределами аномалии, давшая приток пластовой воды; б — № 7 в контуре аномалии, давшая приток нефти

Результаты исследований представляются в виде карто-схем масштаба 1:25000 или 1:10000, на которые нанесены аномальные участки (при наличии таковых) в исследуемом районе (рис. 3).

В процессе апробации данной технологии в различных нефтегазоперспективных регионах бывшего Советского Союза (Западная Сибирь, Пермское Прикамье, Привятский район Татарстана, Украина) выполнен анализ пригодности ряда серийных технических средств аэрокосмической съемки. Основным требованием к средствам многозонального дистанционного зондирования при решении нефтегазопоисковых задач являются: пространственное разрешение R на местности — не ниже 20—30 м, фотометрическая точность индикации в каждом из зональных каналов — не ниже 1 %, а их ширина для зеленой, красной и ближней инфракрасной зон — не более 60—80 нм. Таким требованиям в разной мере отвечают фотографические камеры МК-4, МКФ-6М, МСК-4 (все Россия), а также сканерные системы: МСУ-Э (Россия), «Landsat-5, -7» (США), «Spot-1, -2, -4, -5» (Франция), IRS-2 (-3, -4, -5) (Индия). Необходимо отметить, что по сравнению со сканерами фотографические системы имеют более высокое пространственное и фотомет-

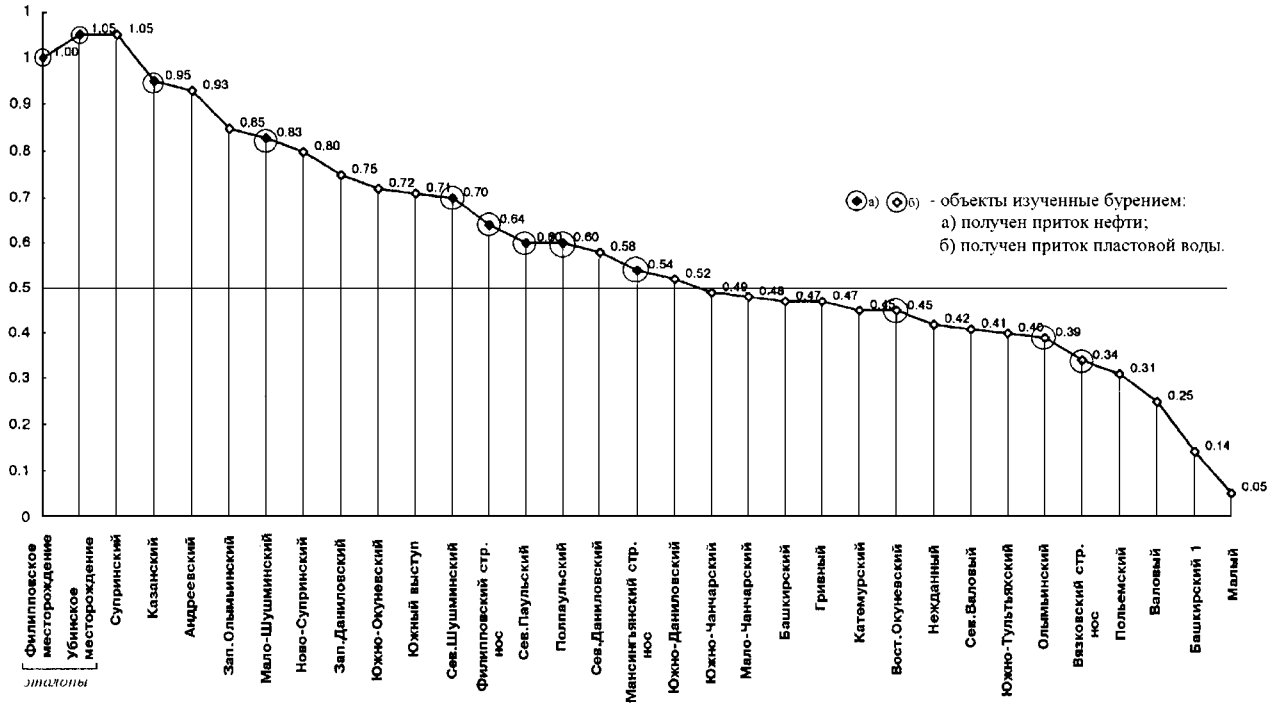


Рис. 4. Ранжирный ряд нефтеперспективных объектов. Западная Сибирь. 1991—1995 гг.

рическое разрешение, более узкую ширину спектральных каналов. Преимуществом сканерной съемки является то, что ее результаты могут быть получены непосредственно в цифрой форме, практически в реальном масштабе времени. Далее исходя из характеристик используемой аппаратуры и вида съемки (космической или аэро-) определяется тип фаций растительности, которые могут быть использованы для решения поставленных задач. При космической съемке (R ≤ 30 м) объектами фотометрирования являются крупные поля, занятые сельхозкультурами и лесные массивы. При аэрофотосъемке (R = 2...5 м) можно использовать узкие полосы растительности: поймы рек, луга, широкие полосы лесопосадок.

Сопоставление результатов космо- и аэросъемки проводилось по 14 нефтеперспективным объектам Татарстана. При этом были использованы материалы многозональной аэрофотосъемки (МСК-4, 1:50000) и космической фотосъемки (МК-4 в масштабе 1:800000) в зеленой, красной и ближней инфракрасной зонах спектра. В обоих случаях результаты практически совпадали.

При апробации предлагаемой спутниковой технологии в процессе наземных подспутниковых работ широко исследовалась реакция разных видов растений на влияние залежей УВ, определялись оптимальные сроки фотометрирования с целью определения условий и сроков проведения аэрокосмической съемки. Полученные результаты внесены в банк данных и служат априорной информацией.

Результаты апробации доказали принципиальную возможность регистрации оптических аномалий растительного покрова существующими дистанционными и наземными средствами, а также возможность определения характера данных аномалий, обусловленных: залежью углеводородов (УВ) [7—9]; природными и антропогенными факторами [10]; приуроченностью к флюидопроводящим зонам литосферы [9, 11].

Апробация показала, что при помощи спутниковой технологии могут быть решены следующие типы нефтегазопоисковых задач:

I — ранжирование нефтегазпоисковых объектов, подготовленных при помощи различных геологических и геофизических методов по критерию продуктивности (Западная Сибирь, Татарстан, Пермь, Прикамье);

II — уточнение внешнего контура нефтегазоносности, в особенности для залежей УВ, характеризующихся гетерогенным строением природных резервуаров (тектонические блоки, литофациальные изменения и др. (ДДВ);

III — оперативная оценка нефтегазоносности поисковых площадей на этапе, предшествующем их вводу в поисковое бурение.

Результаты апробации спутниковой технологии поиска залежей нефти и газа в Днепровско-Донецкой впадине по состоянию на 01.01.2002

Исследованный поисково-разведочный объект (район скваж.)	Название оптической аномалии (год)	Изучены бурением № скваж. (год)	Коэффициент подтверждаемости	Подтверждение прогнозов × да ○ нет
Южно-Качановский	Аномалия отсутствует (1994)	237 (1995)	1.0	×
ЧЕРНЕТЧИНСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Северо-Западный	Северо-Западная (1994)	7 (1995)	1.0	×
Северо-Восточный	Аномалия отсутствует (1994)	4 (1995)	1.0	×
Северо-Восточный	Северо-Восточная II (1994)	22, 23, 25, 24 (1996)	0.75	× × × ○
ЗАПАДНО-РЫБАЛЬСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Юго-Западный (св. 190, 1-Сух.)	Юго-Западная I (1995)	*1-Сух. (1997)	1.0	×
Северо-Восточный (св. 192)	Малоинтенсивная аномалия (1996)	192 (1999)	1.0	×
Западно-Рыбальский	Центральная (1995)	193 (2001)	1.0	×
СЕРЕДНЯКОВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Середняковский	Середняковская (1996)	2 (1997), 5 (1999)	0.5	× ○
ВОСТОЧНО-РОГИНЦЕВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Восточная периклиналь	Западная I (1995)	51 (1996)	1.0	×
Западная периклиналь	Западная II (1996)	50, 61 (1997)	1.0	× ×
МИТЯЕВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Овиновский	Аномалия отсутствует (1996)	1 (1998)	1.0	×
БИЛИЧЕВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Биличевский	Восточная (1997)	*3-Голот. (1998)	1.0	×
КОЗИЕВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Западно-Козиевский	Западно-Козиевская (1996)	63 (2000)	0.0	○
Козиевский	Козиевская (1996)	24 (1997)	1.0	×
КАЧАЛОВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Качаловский	Качаловская	10 (1998)	1.0	×
ВОСТОЧНО-РЕШЕТНЯКОВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Восточно-Решетняковский	участок 1 (1999)	101	0.0	○
ЮЖНО-ГНЕДИНСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Южно-Гнединский	Северная (1997)	1Ю.-Гнед. (2001)	1.0	×
ИВАНОВСКАЯ ПЛОЩАДЬ				
Ивановский	Ивановская	1-Ив (2000)	0.0	○

В процессе апробации спутниковой технологии положительные результаты получены на объектах, залегающих на глубинах от 1500 до 5000 м. Изучена реакция более 30 видов травянистых и древесных растений. Установлено, что практически все растения в той или иной степени индицируют наличие залежи УВ.

В настоящее время наиболее разработанной является методика ранжирования нефтегазопоисковых объектов по критерию продуктивности и определения очередности ввода их в поисковое бурение. В производственном режиме в Шаимском нефтеносном районе Западной Сибири в течение 1991—1995 гг. исследован 31 объект, 10 проверено бурением. Прогноз подтвердился на 100 % (рис. 4).

На нефтеперспективных территориях Пермской области и Татарстана проранжировано 28 объектов. На шести из них проведено поисковое бурение, прогноз подтвердился на 67 %.

В ландшафтно-геологических условиях Днепровско-Донецкой впадины (Украина) исследовательско-методические работы проводятся с 1994 г. Всего по состоянию на 01.01.2002 г. исследовано — 48 объектов (таблица). Проверено бурением — 18. Коэффициент подтверждения результатов исследований — 0.85. Перспективы развития спутниковой технологии и пути ее совершенствования представляются следующими:

— доработка спутниковой технологии прогноза залежей УВ с учетом не подтвердившихся поисковым бурением аномалий, анализ и внесение коррективов в технологию;

— доработка методики исследования разломов, зон трещиноватости и оценка их флюидопроводимости;

— доработка методики изучения внутренней структуры поля нефтегазоносности, выделение перспективных тектонических блоков, зон литологического и стратиграфического выклинивания продуктивных горизонтов;

— введение данной технологии в комплекс обязательных геологоразведочных работ на нефть и газ. Для малоизученных районов экономически выгодно оценку их перспективности проводить дан-

ным методом на стадии, предшествующей постановке детальных сейсморазведочных работ;

— дальнейшее повышение роли аэрокосмической информации в решении нефтегазопоисковых задач. Это позволит значительно сократить сроки исследований (с 12 до 2—3 месяцев).

Таким образом, выполненный цикл апробации спутниковой технологии прогноза залежей нефти и газа в производственном режиме на площадях Западно-Сибирской и Днепровско-Припятской нефтегазоносных провинций по состоянию на сегодняшний день показывает высокую степень подтверждаемости результатов прогноза (не менее 0.8). Это свидетельствует об адекватности теоретических моделей нефтегазогеологических, неогеодинамических и флюидогеодинамических процессов, составляющих научную основу спутниковой технологии, реальным моделям, обоснованности методики проводимых исследований. Указанные факты дают основание утверждать, что разрабатываемая спутниковая технология прогноза залежей нефти и газа отвечает современным требованиям и позволяет оптимизировать нефтегазовый процесс, реализовать решение задачи развития собственной минерально-сырьевой базы Украины за счет ускорения и удешевления процесса выявления нефтегазовых месторождений.

1. Перерва В. М., Лялько В. И., Архипов А. И. и др. Прямой поиск залежей нефти и газа дистанционными методами (предварительный опыт, перспективы развития). — К., 1995.—83 с.—(Препринт / НАНУ. ЦАКИЗ НАНУ).
2. Брукс Р. Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых. — М.: Недра, 1986.—311 с.
3. Мовчан Л. И., Каневский В. А., Семичаевский В. Д. и др. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. — К.: Наук. думка, 1993.—305 с.
4. Зорькин Л. М., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. и др. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцеобразных геофизических,геохимических и биохимических полей в осадочном чехле земной коры // Открытие от 24.07.80, № 234.
5. Ребрин Ю. К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. — Киев: КВВАИУ, 1988.—449 с.
6. Авлиани Г. В. Эвристические методы в распознавании образов. — Тбилиси, 1988.—77 с.
7. Перерва В. М. та ін. Оптимізація процесів пошуку та розробки родовищ нафти і газу на основі супутникових технологій // Методичний посібник по тематичній інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок «Нові методи в космічному землезнавстві». — К., 1999.—С. 202—211.
8. Архипов О. І., Перерва В. М., Левчик О. І. та ін. Оптичні аномалії рослинності як індикатор покладів вуглеводнів // «Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології та геофізики»: Доп. наук. конф. — К., 2000.—С. 52—57.
9. Архипов А. И. и др. Аэрокосмические методы исследования геоэкологической обстановки в районах нефтедобычи // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—1999.—1, № 7.—С. 83—86.
10. Товстюк З. М., Перерва В. М., Архипов О. І. и др. О возможности использования оптических характеристик растительности для картирования активных разломов // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—2000.—1, № 9.—С. 70—72.
11. Перерва В. М. Геодинамічні основи супутникових технологій пошуку промислових скупчень вуглеводнів // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 1999.—С. 165—194.

Геотермічний режим та оцінка перспектив нафтогазоносності північно-західної частини шельфу Чорного моря

В. Г. Осадчий, О. А. Приходько, І. І. Грицик

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України та НАК «Нафтогаз України», Львів

Одним з перспективних регіонів України з нарощування запасів вуглеводнів є український сектор акваторії Чорного моря. За даними геолого-геофізичних досліджень в межах північно-західної частини шельфу Чорного моря виділяються: Придобрудзький нафтогазоносний район з Алібейською та Зміїною зонами; Каркінітський нафтогазоносний район з Бакальською, Голицинською, Михайлівською і Гамбурцівсько-Тарханкутською зонами; Крайовий та Нижньодунайський перспективні райони [1].

В північно-західній частині відкрито більше десяти промислових та непромислових газових та газоконденсатних родовищ. Колекторами є пісковики, вапняки та мергелі верхньої крейди, палеоценеоцену та верхнього олігоцену—нижнього міоцену. Ро-

© В. Г. ОСАДЧИЙ, О. А. ПРИХОДЬКО, І. І. ГРИЦИК, 2002

довища багатопластові (Голіцинське) та однопластові (Штормове). Глибина залягання продуктивних горизонтів від 500 до 2190 м [2].

Для рішення теоретичних та прикладних проблем нафтогазової геології та геофізики досліджуваного регіону даних з розподілу теплового потоку недостатньо, тому виникла необхідність провести детальне вивчення розподілу геотермічних параметрів з використанням нових даних, отриманих в процесі пошукових робіт та переінтерпретації геотермічних матеріалів, опублікованих раніше. Нагромаджений досвід з визначення оптимальної кількості геотермічних параметрів, які дозволяють дати найбільш повну та достовірну інформацію по їх розподілу можуть бути [4]:

— розподіл «фонових» регіональних температур на глибині 2000 м, що обумовлено найбільшою кількістю даних по замірах температур в глибоких свердловинах;

— розподіл значень середніх геотермічних градієнтів в інтервалі »нейтральний шар» — максимальна глибина заміру температури в свердловині. Ця величина необхідна для прогнозування розподілу температур на різних глибинних зрізах;

— розподіл температур на глибині 5000 м. Прогноз температур на даному зрізі необхідний для розробки технічних завдань та геологічних побудов при проектуванні закладення надглибоких свердловин і рішення питань міграції вуглеводнів та формування їхніх покладів;

— карта глибин залягання ізотермічної поверхні 150 °С, як основа прогнозу фазового стану вуглеводнів на великих глибинах для більш достовірного підрахунку запасів нафти, газоконденсату та газу в осадовому чохлі.

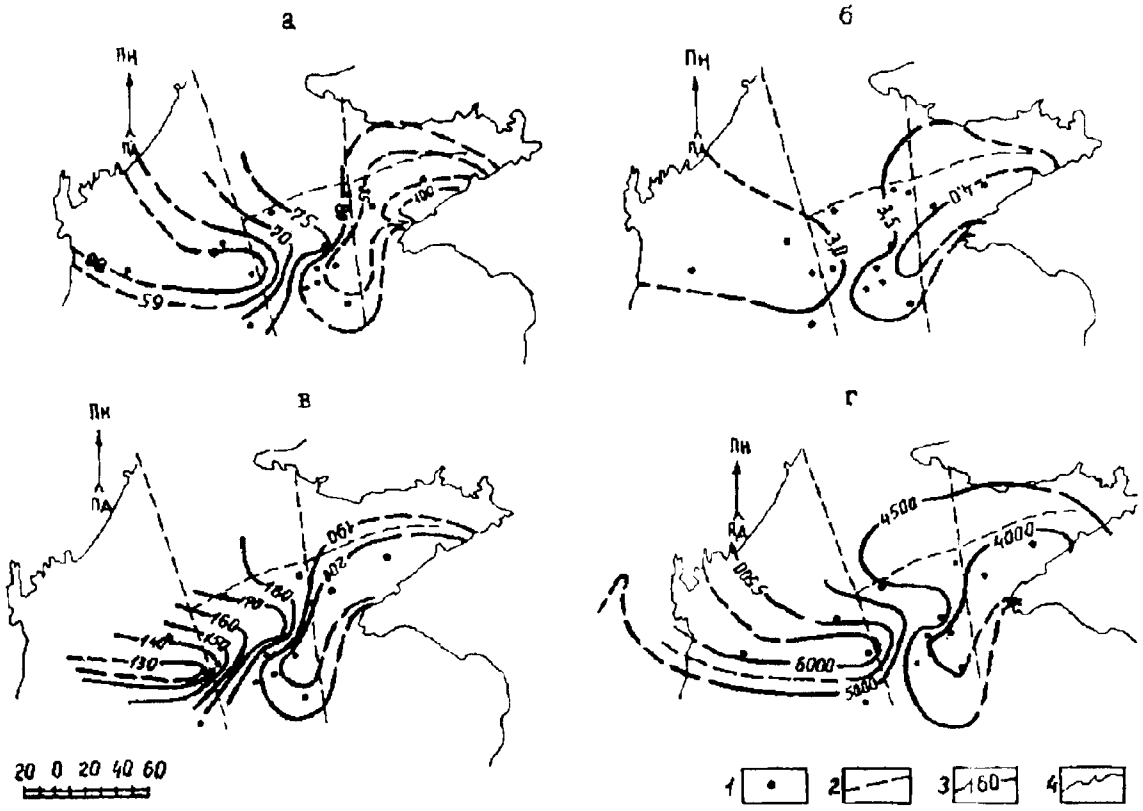
Незначний об'єм буріння на шельфі, відсутність даних замірів температур, геотермічних градієнтів в глибоких свердловинах, розрізнена геотемпературна інформація при проведенні геофізичних досліджень та випробуванні свердловин — це причина малої кількості кондиційного геотермічного фактичного матеріалу для побудови карт розподілу геотермічних параметрів, як в вертикальному розрізі осадової товщі, так і по площі об'єкта досліджень. Використано дані геотермічних замірів по 22 глибоких свердловинах, 112 замірів температури при випробовуванні можливих продуктивних горизонтів та 72 термограми, знятих при проведенні геофізичних досліджень свердловин. Це дозволило визначити геотермічний режим шельфової зони північно-західної частини Чорного моря та побудувати карти розподілу геотермічних параметрів.

На рис. 1, а наведена карта розподілу регіональних «фонових» температур на глибині 2000 м. Найбільше забезпечений фактичним матеріалом Каркінітський нафтогазоносний район, в межах якого, до речі, відкрита більшість родовищ вуглеводнів. Значення температур закономірно зменшується зі сходу (Тарханкутський півострів) на захід і змінюється від 100 до 65 °С (зона Одеського глибинного розлому). Необхідно відмітити, що ізотермою температури 80 °С виділяється максимально прогріта зона (80—100 °С), яка чітко пов'язана з розподілом температур на однойменній глибині суші Тарханкутського півострова. Ізотерма 75 °С являє собою границю менш прогрітого району шельфу, який тяжіє до Придобрудзького прогину. В цьому районі значення температури коливається від 75 до 60 °С. Встановлена значна площа розповсюдження найнижчих температур (60 °С). За геофізичними дослідженнями глибинні регіональні розломи на температурному полі виділяються слабо, що пояснюється недостатньою кількістю фактичного матеріалу.

Розподіл середніх «фонових» регіональних геотермічних градієнтів подано на рис. 1, б. Повністю підтверджено наявність в межах досліджуваної території двох різнопрогрітих зон: зона високих значень геотермічного градієнту (3.5—4.0 °С/100 м), яка тяжіє до Кримського півострова та зона низьких його значень (3.0 °С/100 м), яка притаманна Придобрудзькому прогину. Складається враження, що трасування Одеського глибинного розлому (його південна частина) за даними сейсмічних досліджень проведено не досить вдало. Після його перетину з поздовжнім глибинним тектонічним порушенням (Голіцинське), він різко змінює прямолінійний напрямок і відхиляється на північний схід, приблизно на 15—20 км. При наявності достатнього геолого-геофізичного матеріалу слід розглянути це припущення детальніше. На рис. 1, в подана карта розподілу регіональних «фонових» прогнозних температур на глибині 5000 м. Враховуючи те, що проведена досить далека, екстраполяція (від 3000 до 5000 м), та недостатня кількість матеріалів про глибинну геолого-геофізичну будову (літологічний склад порід, їх теплопровідність, значення теплового потоку та інше) межа розподілу геотермічних параметрів на досліджуваній території дещо розмита і не так чітко фіксується Одеським глибинним розломом, але все ж виділяється високопрогріта (170—200 °С) східна та низькопрогріта (130—170 °С) західна зона шельфу.

Згідно з встановленою просторовою зональністю розповсюдження покладів вуглеводнів в осадовому чохлі земної кори, а саме, що у теплих зонах, як правило, розповсюджені газові та газоконденсатні поклади, а в холодніших — нафтові [3], перспективи нафтоносності шельфу Чорного моря слід пов'язувати з Придобрудзьким нафтогазоносним районом, особливо із Зміїною зоною.

Для оцінки фазового стану вуглеводнів дослід-



Карта розподілу геотермічних параметрів північно-західного шельфу Чорного моря (М 1:500000): а — температур на глибині 2000 м; б — середніх геотермічних градієнтів; в — прогнозних температур на глибині 5000 м; г — карта глибин залягання ізотермічної поверхні 150 °С. Умовні позначення: 1 — точки спостереження, 2 — тектонічні порушення, 3 — ізолінії розподілу геотермічних параметрів, 4 — берегова лінія

жуваної території побудовано карту глибин залягання ізотермічної поверхні 150 °С (рис. 1, г). Для східної частини шельфу (границя — Одеський глибинний розлом) глибина залягання ізотермічної поверхні змінюється від 4000 м (Крим) до 4500 м (Одеський розлом). В північно-західній частині від 5000 м (Одеський розлом) до 6000 м (район острова Зміїний).

Таким чином, поклади нафти можуть бути відкриті на глибинах до 6000 м в межах Крайового перспективного району, Алібейській та Зміїній зонах. Відкриття нафтових родовищ в Каркінітському нафтогазоносному районі малоймовірне. Це обумовлено термобаричними умовами, геохімічними перетвореннями та процесами тепломасопереносу в інтервалі фундамент — «поверхня Землі».

1. Деркач М. П., Крупський Б. Л., Гладун В. В. та ін. Освоєння ресурсів газу і нафти Українського сектора акваторії Чорного і Азовського морів // Геологія і геохімія горючих копалин.—2001.—№ 1.—С. 3—19.
2. Ларченков Е. П. Нафтогазоносність Чорного моря // Геология Чорного и Азовского морей. — 2000.—С. 136—142.
3. Осадчий В. Г., Лурье А. И., Ерофеев В. Ф. Геотермические критерии нефтегазоносности недр. — Киев: Наук. думка, 1976.—142 с.
4. Осадчий В. Г., Приходько О. А., Грицик І. І. Оцінка перспектив регіональної нафтогазоносності півдня України за геотермічними параметрами // Геологія горючих копалин України.—2001.—С. 192—193.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 209—217

Екологічні задачі

Вивчення екологічного стану урбанізованих та промислових територій України за багатозональними космічними знімками

А. Г. Мичак[1], Л. П. Ліщенко[1], О. М. Теременко[1], О. І. Кудряшов[1], М. С. Щепець[2]

[1]Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

[2]Київська міська державна адміністрація, ДКП «Плесо», Київ

Питання вивчення екологічного стану міських агломерацій та промислових територій є надзвичайно актуальним завданням для України. Адже саме в цих природно-техногенних системах (ПТС) найяскравіше проявляються негативні тенденції взаємовідносин людської діяльності і природного розвитку довкілля. Дослідження напрямків їх розвитку має принципове значення для визначення оптимальних схем взаємодії системи «людина—природа» при яких процеси самовідновлення природного середовища повинні мати провідне значення.

Традиційні геоекологічні підходи до вивчення стану та розвитку навколишнього природного середовища урбанізованих та промислових територій сьогодні не охоплюють у повній мірі багатогранність функціонування цих природно-техногенних систем. Науково-технічний прогрес вимагає більш інтенсивно впроваджувати нові методи досліджень процесів самоорганізації, стійкості, розпаду, відродження та прогнозування розвитку різних систем і структур живої і неживої природи. І в цьому напрямку великого значення набуває розробка методів, програм та технологій фізичної інтерпретації матеріалів багатозональних космічних зйомок з метою суттєвого підвищення достовірності та однозначності оцінки параметрів ПТС, прогнозування несприятливих процесів в геосистемах. Сучасні матеріали космічних зйомок у різних діапазонах хвиль при тематичній комп'ютерній обробці з використанням ПС-технологій дозволяють досліджувати природно-техногенні системи на якісно новому рівні. А ретроспективний аналіз перших космічних зйомок з кінця 1970-х років у комплексі з даними сучасних зйомок дозволяють досліджувати екологічний стан міських агломерацій та промислових територій в моніторинговому режимі.

У ЦАКДЗ виконано екологічне дешифрування значного об'єму матеріалів космічних зйомок, їхня інтерпретація та комп'ютерна обробка на ряд урбанізованих територій. В результаті багатоступеневої обробки та тематичних досліджень сучасних мультиспектральних знімків з КА «Spot» (Франція), «Landsat», (США), «Ресурс» (Росія), IRS (Індія), «Січ», «Океан-О» (Україна) проведено вивчення екосистем Середнього Придніпров'я, Київської, Запорізької, Херсонської та інших міських агломерацій. Дано оцінку ландшафтно-функціональних систем, несприятливих екзогенних геологічних процесів, які потребують інженерного захисту. Виявлені зони екологічного ризику. Представлені дії техногенезу на навколишнє середовище: літосферу, гідросферу та атмосферу. Значна частина таких розробок увійшла до тематичних атласів «Україна з космосу» [1], «Космос—Україні» [2].

Розглянемо особливості використання багатозональної космічної зйомки на прикладі деяких регіонів України. Досліджувались райони з напруженою екологічною ситуацією, що пов'язана з розробкою родовищ корисних копалин та промисловим комплексом. Вони відрізняються географічним положенням, геологічною будовою та видами техногенного впливу, його наслідками. В залежності від ситуації і поставленого завдання методика використання КС зазнавала змін, про що йдеться далі.

СЕРЕДНЄ ПРИДНІПРОВ'Я

Даний регіон у геологічному відношенні приурочений до південно-східної частини Українського кри-

© А. Г. МИЧАК, Л. П. ЛЩЕНКО, О. М. ТЕРЕМЕНКО, О. І. КУДРЯШОВ, М. С. ЩЕПЕЦЬ, 2002

сталічного масиву, а у фізико-географічному — до Північностепових височин, розчленованих яружно-балковою мережею. На космічних знімках середньої роздільної здатності ландшафти передаються мозаїчним малюнком, обумовленим інтенсивним господарчим використанням території. Територія зазнає значних техногенних змін завдяки діяльності аграрного, гірничо-видобувного, промислового, комунікаційного, селітебного комплексів. Спостерігається значна порушеність геологічного середовища і відбуваються незворотні зміни, які потребують постійного нагляду, контролю та передбачення.

При дослідженні цього регіону був використаний значний банк багатозональних космічних зйомок за останні десятиріччя. Зупинимося на матеріалах зйомки високої роздільності МСУ-В (канали 2—8), виконаної вітчизняним КА «Океан-О». Розглянемо стислу характеристику цих каналів.

2-й канал (0.54—0.61 мкм). Знімки у цій зоні спектру дозволяють розрізняти четвертинні відклади різного літологічного складу, виявляти техногенне порушення грунтів. На них добре відображено кар'єри (наприклад, марганцеві в районі міст Орджонікідзе, Нікополь, Марганець), в тому числі діючі і рекультивовані, а також піщані масиви і греблі (в районі Запорізької АЕС), намивні піщані будівельні майданчики на півдні Запоріжжя в районі Дніпровських плавнів. Сільгоспугіддя, ерозійна мережа, а також міста та села відображаються з дуже малою контрастністю;

3-й канал (0.63—0.73 мкм) найдоцільніше використовувати при виявленні ділянок техногенного порушення поверхні, особливо кар'єрами, відвалами, відкритими грунтами. Дешифрується рослинність, яка може вказувати на більш вологі території, як природні, так і техногенно обумовлені. Цей діапазон дозволяє розпізнати золовідвали Запорізької АЕС, а також відрізнити хмари від димових шлейфів.

4-й канал (0.78—0.92 мкм) придатний для вивчення наслідків екзогенних процесів, таких як ерозія, площинний змив, денудація; а також для картографування морфологічних особливостей рельєфу, водосховищ, зокрема відстійників промстоків. В цьому діапазоні також добре відображаються межі сільськогосподарських угідь та вегетаційний стан рослин на момент зйомки (рис. 1, а).

5-й канал (0.92—0.99 мкм) найдоцільніше використовувати для вивчення тектонічних особливостей території (для структурного, структурно-геоморфологічного дешифрування території, виділення розривних порушень і кільцевих об'єктів, які відбивають глибинну тектонічну будову (в даному випадку Дніпровського блоку Українського кристалічного масиву). Наприклад, на вивченому знімку чітко прослідковується Девладовський і Чортомлицький регіональні розломи, а також серії локальних розривних порушень, які обмежують окремі блоки УКМ. По дугоподібних елементах ландшафту (зокрема по ерозійних врізах) дешифруються позитивні тектонічні елементи. Діапазон може використовуватись при лінеаментному аналізі з метою виявлення напрямків міграції забруднюючих речовин, зон екологічного ризику (рис. 1, б).

6-й канал (1.47—1.62 мкм). Після корекції яскравості і контрастності зображення можна застосовувати для картування перезволожених ділянок, підтоплених територій. Зокрема, на даному знімку добре відобразились подібні ділянки по долинах рр.Томаківка, Конка, Вільнянка і на о. Хортиця. Рослинність не диференціюється. В цьому каналі Дніпропетровська і Запорізька міські агломерації виділяються по спектральних характеристиках та дрібнозернистій структурі зображення, а по збільшенню щільності залізниць і автошляхів в районі транспортного вузла Синельникове. Тобто діапазон придатний для визначення техногенних порушень природних комплексів, оконтурювання техногенних ландшафтів, хоча роздільна здатність каналу невелика (рис. 1, в).

7-й канал (2.06—2.38 мкм): роздільна здатність незначна, дозволяє працювати у масштабі щонайбільше 1:500 000. Зображення можна застосовувати для картографування перезволожених ділянок, підтоплених територій. Міста та сільські поселення відображаються тепловими аномаліями. Теплові аномалії також вказують на промислові зони у великих містах (Запоріжжя, Дніпропетровськ).

8-й канал (10.6—12.0 мкм) дозволяє чітко розмежувати основні компоненти природного середовища, такі як вода, повітря (хмарність), суша, і в їхніх межах виділити ситуаційні теплові аномальні ділянки з метою їхнього обгрунтування та прив'язки. Діапазон дає можливість виділяти перезволожені ділянки (території підтоплення), в межах водосховищ — ділянки «цвітіння води», мінімально, але досить чітко фіксуються різні типи хмарності, і немає тіней від хмар (рис. 1, г).

Отже, структура зображення у окремих каналах сприяє проведенню досліджень екологічного стану і картографуванню території по ландшафтних особливостях і окремих природних та техногенних компонентах. Виділяється гідро- і ерозійна мережа, видно різницю між сухими і вологими днищами балок. При значному збільшенні можна дешифрувати ділянки площинного змиву, підтоплені райони і зрошувані землі. Можна окреслити площі, які займають еродовані землі, сільгоспугіддя, ставки, водосховища. озера, лісові масиви, кар'єри, насипи, греблі і селітебні території. Таким чином, зображення, отримані космічним апаратом «Океан-О»,

Рис. 1. Знімки Середнього Придніпров'я: *а—г* — канали 4, 5, 6, 7

дозволяють виконати оцінку природних ресурсів, скласти карту природокористування, а зіставлення знімків, зроблених у різні роки, дає можливість проводити геоекологічний моніторинг [3].

Високі темпи перетворення геологічного середовища притаманні територіям з інтенсивним відкритим добутком сировини, наприклад Криворізькому залізорудному басейну та марганцеворудним площам на Нікопольщині. Ці регіони вимагають систематичних спостережень за екологічним станом природного середовища. На основі зображень, отриманих космічними апаратами «Landsat-TM», «Океан-О» МСК-В, а також АФЗ, була складена карта техногенних утворень на ділянку Марганцевсько-Нікопольського гірничовидобувного промислового вузла. Завдяки різним корекціям і класифікаціям в автоматичному режимі дешифрувались як зональні, так і синтезовані зображення. Підбирались такі варіанти обробки зображення, на яких відображаються різні техногенні об'єкти і ландшафтно-техногенні комплекси: гірничовидобувний, гідрологічний, селітебний, промисловий, сільськогосподарський. Із застосуванням старих топографічних матеріалів на правобережжі Каховського водосховища в межиріччі Базавлука і Томаківки проаналізовані зміни в ландшафтно-функціональній структурі району (отримано якісні і кількісні характеристики змін конфігурації населених пунктів та річкової мережі з 1928 року по теперішній час). Було встановлено, зокрема, що площа шламонакопичувачів, відстійників виросла починаючи з 1958 року більш ніж в 7 разів, малюнок ерозійно-річкової мережі 1928 року корінним чином відрізняється від сучасного: Дніпро та його правобережні притоки — р. Томаківка, Базавлук, з притоками Кам'янка і Солена до підтоплення Каховським водосховищем протікали у природних руслах, які меандрували, та мали ділянки низької та високої заплави і надзаплавну терасу. Істотно змінився гідрогеологічний режим території, весь водний стік практично зарегульований. По правобережжю водосховища розвивається і активізується абразія, ерозія та обвали берегів, а в балках нижче греблі ставків та на схилах кар'єрів — бокова та глибинна ерозія. На плоских поверхнях лесових терас спостерігаються процеси суфозії і підтоплення.

Рис. 2. Техногенні зміни в межах Орджонікідзенських кар'єрів Нікопольського промислового вузла: А — космічний знімок КА «Океан-О», МСУ-В, діапазон 0.63—0.73 мкм, від 21.08.2000; Б — космічний знімок КА «Landsat-TM», діапазон 0.63—0.69 мкм, від 10.06.96; В — фрагмент карти техногенних змін марганцевидобувної ділянки

Рис. 3. Київ. Ландшафтно-функціональні зони

Рис. 4. Ділянки з потенційно небезпечними геологічними процесами в межах Києва (знімок з КА «Океан-О», МСУ-В, 0.78—0.92 мкм): 1 — зсуви; 2 — границі підтоплення грунтів

Рис. 5. Геодинамічні зони в межах Києва: 1 — зони геодинамічних напруг (екологічного ризику)

Для вивчення змін природно-техногенного комплексу, що відбулись за 70 років, складена карта динаміки техногенних об'єктів (техногенезу). В знаковій системі представлені такі природні комплекси: орографічний, водний, рослинний; техногенний — промисловий, сільськогосподарський, селітебний, гідротехнічний, агротехнічний.

Кількісний аналіз проводився по основних типах користування кожного з ландшафтно-функціональних комплексів ПТС. У таблиці представлено числові характеристики динаміки змін ландшафтно-функціональних комплексів Орджонікідзенської ділянки Нікопольської природно-техногенної системи (площа в га) [4].

Багатозональні КС дозволили зробити класифікацію марганцевих кар'єрів за станом використання на ті, що знаходяться в експлуатації (свіжі), відпрацьовані (виведені з експлуатації), і рекультивовані (землі, які нині використовують під дачну забудову, сільгоспугіддя або лісопосадки). Виконано також порівняння площ кар'єрів по різночасових знімках. За допомогою останніх була встановлена їхня просторово-часова динаміка (рис. 2).

Проведені дослідження дають можливість одночасно на великих площах вивчати вплив гірничовидобувного комплексу на ландшафт. Зіставлення різночасових зображень допомагає прослідкувати зміни, що відбувалися в природному середовищі в просторі і в часі, тобто провести аерокосмічний моніторинг та прогнозувати напрямки подальшого розвитку геоекологічної структури території.

МІСЬКІ АГЛОМЕРАЦІЇ

Проблема вивчення впливу сучасних антропогенних процесів на формування території міських агломерацій у даний час надзвичайно актуальна. Переважна більшість дослідників, які займаються цією проблемою, вважають, що:

1 — міський ландшафт являє собою сполучення природної і техногенної складових;

2 — існує відносно небагато типів (видів) елементарних ландшафтів міських геосистеми, найбільш характерні з них є група природно-техногенних систем прямого впливу техногенних факторів (селітебні, промислові, гірничо-видобувні, дорожнотранспортні) і група систем, які зазнають непрямого впливу техногенних факторів (активізації несприятливих екзогенних та гідрологічних процесів, забруднення водних акваторій, грунтового і рослинного покриву);

3 — міські ландшафти формуються, як правило, в межах однієї або декількох суміжних природних геосистем, для яких характерною ознакою є подібність сучасних антропогенових впливів по всьому ареалу, а також належність до функціональної зони міста.

В 2000 р. розроблено проект створення в Києві геодинамічного полігону. Основна мета полігонних досліджень — моніторинг сейсмічних, геологічних, геоморфологічних, неотектонічних, гідрогеологічних передумов виникнення небезпечних процесів. Результати досліджень, що плануються на геодинамічному полігоні спільно з даними дистанційних зйомок, слід розглядати як надійну основу для прогнозування, попередження і запобігання катастрофічних ситуацій (при зсувах, підтопленнях, деформаційних процесах на інженерних спорудах та ін.), а також для створення багатоцільової геоінформаційної системи, необхідної для перспективного планування і перспективного розвитку міста [5].

Для вивчення впливу сучасних геологічних процесів на розвиток формування територій міських агломерацій нами досліджувались матеріали дистанційних зйомок у вузьких діапазонах електромагнітного спектру. Зокрема, вивчались матеріали в таких діапазонах: 0.5—0.6, 0.6—0.7, 0.8—0.9 мкм (сканер МСУ-Є), 0.59—0.60, 0.61—0.68, 0.79—0.89 мкм («Spot»), 0.46—0.51, 0.62—0.67, 0.64—0.69, 0.81—0.86 мкм («Ресурс Ф2», МК-4, СА-М).

В результаті багатоступеневої обробки трьох каналів космічного знімка «Spot» за допомогою програмного продукту «ERDAS Imagine» отримано зображення ландшафтно-функціональних зон Київського регіону, з об'єктивною інформацією про розміщення та взаємозв'язок основних функціональних структур міста та околиць (рис. 3).

На екосистему міста впливають особливості природного середовища Києва. Столиця оточена майже суцільним кільцем лісів. В поліській лісовій зоні переважають хвойні породи, а в лісостеповій — листяні. У межах міста значні площі займають природні та штучні лісопарки та парки, зокрема Пуща-Водиця, Голосіївський, Святошинський. Площа зеленої зони понад 43 тис. га, і її значення в екосистемі міста важко переоцінити. Вона являється джерелом чистого повітря для потужного промислового центру, захищає круті схили Дніпра та інші складні в геологічному відношенні території від небезпечних екзогенних процесів, є місцем відпочинку мешканців трьохмільйонного міста.

В цілому промислова та житлова забудови Києва розвивались з урахуванням природних особливостей місцевості. Зручні для значного будівництва площі практично освоєні. Тому в останні десятиріччя ведеться інтенсивне будівництво в заплаві Дніпра. Тут зведено великі житлові масиви: Оболонь, Троєщина, Харківський, Осокорки. Ці масиви побудовано на намивних пісках, що змінило природний ландшафт заплави. На зображеннях чітко виділяються площі намивних пісків під забудо-

ву. Слід відзначити, що комплексний індекс забруднення атмосфери Лівобережжя вищий за Правобережжя. Це бажано враховувати при житловому будівництві в майбутньому.

Заслуговує на уважне вивчення розміщення промислових зон міста, які несуть значне техногенне навантаження. Так, Дарницько-Ватутінський та Подільсько-Куренівський промислові вузли з їхніми значними викидами шкідливих речовин, оточені житловими масивами з високим ступенем урбанізації. Автотранспорт є основним забруднювачем повітря. Однак транспортна мережа міста не відповідає вимогам зниження забруднення. Для цього необхідно продовжувати будівництво кільцевої автомагістралі, що дозволить розвантажити великий транспортний вузол від транзитного автотранспорту.

Для більшості урбанізованих територій в останній період характерний розвиток таких небезпечних геологічних процесів, як підйом рівнів грунтових вод та зсувів. Екологічне дешифрування матеріалів сучасних багатозональних космічних зйомок та їхня інтерпретація з геолого-картографічними даними дозволяють оцінювати і прогнозувати розвиток цих процесів [6].

На геозображенні (знімок в ближньому ІЧ-діапазоні, 4 канал МСУ-В, «Океан-О») подані результати дешифрування сучасних геологічних процесів: зсувів та підтоплення територій Києва (рис. 4).

Зсувні порушення дніпровських схилів завжди були серйозною проблемою для Києва.

Зсувні форми рельєфу набули значного поширення вздовж правого берега Дніпра в зоні шириною 10 км. В ній виділяється п'ять головних зсувних ділянок — Подільська, Центральна, Києво-Печерської лаври, Залаврська та Видубецька. На схилах балок і ярів в межах міста зафіксовано цілий ряд зсувів, які знаходяться на різних стадіях розвитку.

Розвиток зсувів обумовлено багатьма факторами, серед яких головними є вплив гідрометеорологічних процесів в умовах техногенного порушення рослинного покриву, поверхневого і підземного стоків. Максимум зсувної активності припадає на періоди інтенсивного прояву ерозійних процесів, особливо весною при таненні і влітку, під час злив. Основними морфологічними формами є зсуви циркоподібні, зсуви-потоки, а також осипи пісків. На даний період нараховується близько сотні зсувів, більшість з яких стабілізовано повністю або частково. Є ряд потенційно небезпечних ділянок з частково діючими зсувами або такими, що можуть активізуватися при обводнені верхніх горизонтів, вони становлять загрозу для будівель та інженерних комунікацій і потребують постійного контролю.

Картування глибин рівнів грунтових вод (H) та визначення зон підтоплення по матеріалах космічних зйомок здійснюється за ландшафтно-індикаційною методикою, що базується на встановленні зв'язку між видимими на багатозональних знімках компонентами ландшафту (рельєф, грунти, поверхневі води, рослинність). Крім того, у межах території з проективним покриттям (C_v) 30—35 % величина H визначалась з використанням щільності фототону знімка ближнього ІЧ-діапазону (P) згідно з отриманою емпіричною залежністю

$$\ln H = A + B \ln P,$$

де A і B — коефіцієнти, що залежать від типу грунту та C_v, визначаються на тест-ділянках за даними наземних визначень H.

Головними чинниками підйому рівнів грунтових вод в межах Києва є підпор грунтових вод Канівським та Київським водосховищами, створення водозаборів підземних вод, ліквідація природних дрен, підземні інженерні споруди (тунелі метрополітену, підпірні стінки, бетонні «сорочки» русел річок, заглиблені фундаменти будівель), витік води із водонесучих комунікацій, поховання прошарку грунту під намивними пісками та насипними грунтами. Підтоплення житлових і промислових споруд, транспортної мережі становить значну небезпеку для ряду ділянок міста. У деяких районах, особливо на лівобережжі, підтоплення набуло загрозливого характеру.

На тестових ділянках виконувались дистанційні заміри рівнів грунтових вод за допомогою НВЧ-вологорівніміра. В результаті виконаних дистанційних досліджень з відбірковими інструментально-завірочними спостереженнями відзначається підтоплення територій на яких раніше цього не спостерігалося. В останні роки збільшилась амплітуда коливань рівнів грунтових вод протягом року [7].

В цілому результати дистанційних спостережень глибин залягання грунтових вод в межах міської території відзначаються оперативністю, достатньою точністю і дозволяють організувати постійно діючий моніторинг на значних ділянках міських агломерацій з виданням рекомендацій із стабілізації та усунення підйому рівнів грунтових вод на урбанізованих територіях.

Територія Києва та його околиць перетинається значною кількістю неотектонічних розломів субмеридіонального, субширотного і північно-західного напрямків. В ряді розломів спостерігаються прояви активності на сучасному етапі. При геоекологічних дослідженнях за мультиспектральними матеріалами космічних зйомок виконувалось дешифрування зон геодинамічної напруги, які ототожнюються з розривними формами прояву сучасного тектогенезу в осадовому чохлі. Вони дешифруються за космічними знімками у вигляді лінійно організованих елементів ландшафтів, виражених на поверхні Землі, — зон лінеаментів (рис. 5).

Слід відзначити, що частина зон збігається з розломами, виявленими геолого-гефізичними методами. Найбільш потужним з них є Київський розлом субмеридіонального напрямку. В сучасному рельєфі ця геодинамічна зона формує диференційований рельєф крутого правого схилу долини Дніпра висотою 60—70 м. Тут спостерігається активізація гравітаційних екзогенних процесів (зсуви, ерозія). Зона зіставлення з Придніпровським розломом дешифрується в заплаві Дніпра і має північно-західне простягання.

На схемі представлені зони, що на даному етапі виділяються лише при дешифруванні матеріалів дистанційних зйомок. Вони мають субширотний та північно-східний напрямки. В ландшафті вони тяжіють до долин малих річок (Дарничанка, Либідь та ін.), зон розвитку екзогенних процесів, підтоплення грунтів. Інтенсивний розвиток сучасних екзогенних процесів в зонах геодинамічної напруги простежується при зіставленні рис. 4 та 5.

З точки зору сучасної геодинамічної нестабільності особливої уваги вимагають вузли геодинамічних зон. Їх характеризує високий рівень тектонічної роздрібненості, що простежується у верхній частині осадового чохла і активізація сучасних екзогенних процесів.

Розглянемо особливості Запорізької екосистеми, де головним чинником її формування є металургійний і машинобудівний комплекс. В геоструктурному відношенні місто розташоване на південному схилі Українського щита, у межах Придніпровської височини. Особливості геологічної будови території обумовлені розломно-блоковою тектонікою; формуванням блокової структури, зв'язаної з розломами глибинного закладення. Найбільш поширені плейстоценові еолово-делювіальні лесові відклади, фізичні властивості яких разом із іншими ендогенними та екзогенними факторами обумовлюють характер та напрямок геодинамічних процесів. Широко представлено форми рельєфу, що обумовлені діяльністю підземних вод — зсуви та просадки. Серед сучасних геодинамічних процесів найсуттєвішими є: розмив та акумуляція постійними водотоками, площинний змив та лінійний розмив, зсувоутворення, утворення просадок у лесоподібних суглинках, розмив та акумуляція берегів водосховищ. Найбільшої уваги з негативних геологічних процесів заслуговує підтоплення.

Для вивчення екологічного стану міста було використано космічні знімки «Spot», «Ресурс-Ф1», «Ресурс-Ф2», а також аерофотознімки, отримані у видимих (0.4—0.7 мкм) та інфрачервоних (0.8—0.9 мкм) променях. На матеріалах космічної зйомки за особливостями фототону та структурного малюнка фотозображення окреслено міську агломерацію, території орного землеробства, ліси, водну поверхню, заплаву, залізниці та шосе. Простежено територію металургійного комбінату «Запоріжсталь» та працюючих з ним у комплексі підприємств чорної металургії. Особливо виразно цей промисловий район відображається у ІЧ-діапазоні (0.8—0.9 мкм) та на синтезованих зображеннях, створених з участю ІЧ-каналу. У цьому каналі також добре відобразились водна поверхня, берегова лінія Дніпра з його водосховищами, ставки, зволожені та заболочені площі, межі сільськогосподарських угідь.

«Голубі» канали КС (0.4—0.5 мкм) дали змогу зафіксувати димовий шлейф від металургійних комбінатів, розташованих у північній частині міста. Смуга диму у кілька кілометрів завширшки розповсюджується на відстань понад 50 км. Аерокосмічні знімки у жовтій і оранжовій смугах (0.6—0.75 мкм) дали змогу простежити забруднення водного середовища промисловими стоками.

По космічних знімках в межах Запоріжжя та його околиць виявлено мережу розривних порушень. Багато з них не закартографовані традиційними геолого-геофізичними методами. Являючи собою зони підвищеної тріщинуватості, проникності, подібні приховані зони розривних порушень відіграють неабияку роль у процесах міграції флюїдів, у формуванні ландшафтів, включаючи рельєф і рослинність. У зонах розривних порушень розвиваються лінійна ерозія, зсувоутворення, просади.

По аерофотознімках простежено сучасні геодинамічні процеси, визначено межі міської агломерації, промислові зони, зафіксовано звалища промислових та побутових відходів, проведено районування селітебних територій, на райони з багатоповерховою та одноповерховою забудовою. Картографуючи звалища відходів та оцінюючи їхнє положення на місцевості, можна передбачити напрямок та масштаби забруднення грунтів, підземних водоносних горизонтів, водного середовища, атмосфери.

Міська агломерація займає площу приблизно 120 км^2. Промислові зони складають більш як 40 % її площі. Місто являє собою складний комплекс взаємозв'язаних систем, що включають селітебні та промислові зони, зелені насадження, транспорт та інженерні споруди.

Головними факторами, що забруднюють навколишнє середовище, є комбінат «Запоріжсталь», алюмінієвий, титаномагнієвий, коксохімічний та інші заводи металургійного комплексу. Аерозолі від них простежуються на відстані понад 50 км. Майже на таку ж відстань розповсюджуються вздовж течії Дніпра і рідкі відходи цих підприємств. Звалища твердих відходів заповнюють гирла Кичкаської та Середньої балок. Ними виведено із землекористування біля 7 км^2 землі, підтоплено та забруднено грунти навколо звалищ. Найбільшого техногенного

Динаміка ландшафтно-функціональних комплексів Нікопольського промислового вузла

Ландшафтно-функціональні комплекси	Тип природокористування	1928 р.	1958 р.	1972 р.	1986 р.	1999 р.
Селітебні	Міського типу	870	1605	2815	3470	3551
	Сільського типу	3300	2900	2918	2753	2700
Промислові	Промислові зони	300	550	1015	1224	1230
	ГЗК	0	50	200	280	474
Гірничо-видобувні	Кар'єри	0	700	2900	3760	3615
	Рекультивовані землі	0	0	1220	3055	3900
	Терикони, відвали порід	40	100	260	300	320
	Відстійники		330	420	766	770
Гідротехнічні	Водосховища ставки	600	1300	1800	2017	2300
Сільськогосподарські	Дачні ділянки	0	0	160	390	494
	Сади та виноградники	1880	2500	1800	1363	1250
	Теплиці	0	10	25	41	46
	Тваринницькі комплекси	120	250	380	420	420
Лісотехнічні	Ліси та парки	600	860	1100	1100	1105

навантаження зазнає північна частина міста, адже тут зосереджені майже всі підприємства чорної металургії, ГЕС, шосе республіканського значення. Треба зазначити, що по матеріалах дистанційних зйомок в районі ГЕС простежено потужну зону розривних порушень субширотного орієнтування.

Значного техногенного навантаження зазнали плавні, тобто незначна частина заплави Дніпра на півдні міста, яка не була затоплена водами Каховського водосховища. Тут у 80—90-х роках було розпочато будівництво нового житлового району, площа якого на 1991 рік складала вже 6 км^2. Численні протоки заплави отруєні стічними водами: вище за течією відбувається скид у Дніпро промислових («червона вода»), а також побутових (міський каналізаційний колектор) стоків.

Водне середовище у межах міста та його околицях зазнало величезних перетворень. Практично не залишилось жодної річки, яка б зберегла первісний природний вигляд та якість води. Всі притоки Дніпра підпружено водосховищами. Внаслідок цього підтоплені заплави річок Конка, Кагарлик, Гадюча та ін. У заплавах утворились болота. Застійний режим та промислові відходи різко погіршили якість води. На берегах водосховищ ідуть процеси абразії та акумуляції. Долина Мокрої Московки спотворена кар'єрами.

За межами міста дистанційні матеріали дозволили зафіксувати деякі сучасні геологічні процеси, що є наслідком техногенної діяльності. Наприклад, іригація на вододілі Конки та Мокрої Московки призвели до масового утворення просадок у лесоподібних суглинках, інтенсивна оранка є причиною площинної та лінійної ерозії на схилах багатьох балок як на правому, так і на лівому берегах Дніпра. Площинна ерозія уразила більше 3 % орних земель.

В цілому головною метою комплексного аналізу стану урбанізованих та промислових територій України є оцінка геоекологічного ризику, його вплив на життєдіяльність населення, обгрунтування принципової схеми експертних оцінок стану геосистем, створення прогнозних моделей їхніх змін при різних варіантах взаємодії природної і техногенної підсистем, оцінка вірогідності проявів несприятливих процесів та їх наслідків.

1. Лялько В. І., Федоровський О. Д. та ін. Україна з Космосу (Атлас дешифрування знімків території України з космічних апаратів) // Космічна наука і технологія. Додаток.—1997.—№ 3/4.—36 с.
2. Лялько В. І., Федоровський О. Д. та ін. Космос—Україні (Атлас тематичного дешифрування знімків території України з українсько-російського космічного апарата «Океан-О» та інших космічних апаратів). — Киев: НКАУ—НАНУ, 2001.—106 с.
3. Ліщенко Л. П. Використання даних дистанційного зондування землі для вивчення геоекологічної ситуації на території Нікопольського промислового вузла // Докл. III Междунар. научно-практической конф. «Проблемы геоинформатики при комплексном освоении недр». — Днепропетровск, 2001.—С. 65—72.
4. Мичак А. Г., Ліщенко Л. П., Кудряшов О. І. Дистанційна індикація основних видів техногенного впливу на природні комплекси на прикладі Нікопольського гірничо-промислового району // «ГІС—Форуму-2000». — Киев, 2000.—С. 91—96.
5. Старостенко В. И. Баран П. И., Барщевский Н. Е. и др. Киев: геология и геофизика окружающей среды и факторы, неблагоприятно на нее влияющие // Геофиз. журн.—2001.—**23**, № 4.—С. 3—38.
6. Теременко. О. М., Лялько В. І., Федоровський О. Д., Рябоконенко О. Д. Екологічна інтерпретація космічних зйомок міських агломерацій // «Нові методи в аерокосмічному землезнавстві.». — Киї: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 1999.—С. 156—162.
7. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Котляр А. Л., Теременко А. Н. Контроль областей подтопления в пределах г. Киева с помощью активного зондирования в СВЧ-диапазонах // Геофиз. журн.—2001.—**23**, № 4.—С. 39—45.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 218—221

Використання аерокосмічного та газогеохімічного методів для вивчення загазованості приземного шару атмосфери територій нафтовидобутку у Передкарпатському прогині

А. Г. Мичак[1], О. І. Кудряшов[1], В.Є. Філіпович[1], О. Г. Калінкін[2], Н. П. Максимович[3]

[1]Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

[2]Відкрите акціонерне товариство «Укрнафта», Київ

[3]Київський державний університет, Київ

Гострою екологічною проблемою територій довготривалого нафтогазовидобутку є висока загазованість, тобто наявність присутність високих концентрацій газоподібних вуглеводнів (ВВ) природного походження у нижніх шарах атмосфери. Причиною виникнення загазованих ділянок на денній поверхні є існування в товщі земної кори корисних копалин, які містять або генерують вуглеводневі газові суміші. Типовими у цьому відношенні є поклади нафти і газу, які локалізовані у природних резервуарах (проникних тріщинуватих породах), де існує рівновага між силами, що примушують нафту чи газ переміщуватись, і силами, які перешкоджають цьому. До останніх, так званих флюїдоупорів, відносяться глинисті і хемогенні товщі, трапові, інтрузивні й ефузивні тіла і т. п. Чим більша їхня потужність, тим кращі екрануючі властивості і здатність утримувати поклад вуглеводнів. Незважаючи на наявність флюїдоупору, потік ВВ від покладу нафти чи газу до денної поверхні відбувається завдяки дифузійно-ефузійним процесам через флюїдоупори, по тектонічних розломах та зонах тріщинуватості гірських порід.

Рушійною силою міграційних процесів є перепад тиску. При тиску на контурі газового покладу, який дорівнює гідростатичному або більшому від нього ($P_{пл} \geq P_г$), відбувається фільтрація газу із покладу вгору до поверхні землі як у відкритих порах, так і по зонах розущільнення гірських порід. У випадку, коли $P_{пл} < P_г$ міграція здійснюється переважно по зонах тріщинуватості. Вертикальна міграція ВВ проходить головним чином у зонах різкого погіршення екрануючих властивостей покрівлі.

Якщо над покладами ВВ гірські породи (флюїдоупори) мають однорідну проникність, то при стаціонарному дифузійному потоці на денній поверхні утворюється так звана газова аномалія (загазована ділянка), що має прямий ефект, тобто знаходиться просто над покладом. При неоднорідній проникності пластів, перекриваючих поклади ВВ, ділянки загазованості можуть мати довільну форму та різну концентрацію газу, що залежить від умов залягання газопроникних перекриваючих порід, форми структури та особливо тектонічної будови.

Окрім цього, суттєвим фактором утворення загазованих ділянок є примітивний характер методів видобутку вуглеводнів, які використовували у XIX — на початку XX століть. Нафту та озокерит тоді розробляли за допомогою колодязів, шурфів, негерметичних свердловин. Ці гірські виробки сприяли прямій міграції газів від місця їхнього скупчення до денної поверхні. Це так званий техногенний фактор утворення загазованих ділянок. Інтенсивність забруднення газом денної поверхні у цьому випадку знаходиться в прямій залежності від щільності гірничих виробіток, їхньої конструкції, якості ліквідації.

Загазованість приземного шару атмосфери також пов'язана з негерметичністю об'єктів нафтогазового господарства (газопроводи, резервуари, компресорні станції тощо).

Таким чином, утворення загазованих ділянок є наслідком природної та техногенної складових.

Одним із найхарактерніших прикладів району, забрудненого природними вуглеводневими газами в Україні, є місто Борислав Львівської області. Під-

© А. Г. МИЧАК, О. І. КУДРЯШОВ, В.Є. ФІЛІПОВИЧ, О. Г. КАЛІНКІН, Н. П. МАКСИМОВИЧ, 2002

вищені концентрації газоподібних вуглеводнів в атмосфері цього населеного пункту існували з давніх часів, оскільки нафтовмісні породи (які є, одночасно, і газогенеруючими) тут виходять на денну поверхню, але ситуація загострилась з початком розробки однойменного нафтогазового родовища. За літературними даними у межах Борислава у кінці XIX на початку XX століть було споруджено близько 20 тисяч шахт та колодязів для видобутку нафти та озокериту глибиною до 100 м, а кількість свердловин перевищила тисячу. Багато ліквідованих свердловин зараз є джерелами природного газу, особливо ті, що були пробурені у XIX ст. і мають негерметичну конструкцію. Деякі горловини свердловин зараз знаходяться під фундаментами будинків.

Явище загазованості почали систематично вивчати з 1972 року, коли стався вибух газовуглеводнево-повітряної суміші в одному із житлових будинків міста. З того часу цілий ряд колективів [1—5] займалися дослідженням об'єктів загазованості, вивченням їхніх властивостей; робились спроби скласти карту загазованості міста. На основі отриманих результатів здійснювали широкомасштабні заходи по зниженню рівня загазованості. Незважаючи на певні успіхи в цьому напряму, проблема досі не вирішена.

Вивчення природного середовища по аерокосмічних знімках у комплексі з наземними газогеохімічними вимірами зараз є одним з найперспективніших методів вивчення загазованості. При такому комплексуванні дистанційний і польовий методи взаємно доповнюють один одного: наземні інструментальні виміри дають кількісні характеристики, забезпечують конкретність; аерокосмічні — оглядовість, оперативність, топографічну прив'язку.

Методика таких досліджень поки що знаходиться у стадії становлення. В її основу покладено показники контрастності зображень, отриманих у вузьких спектральних діапазонах. Цей підхід дозволяє вибрати такі знімки, або їхні співвідношення, де спектральний контраст перевищує інтегральний, що дозволяє реєструвати малоконтрастні об'єкти (рослинні асоціації), походження яких обумовлено наявністю у грунті вуглеводнів завдяки їхньої міграції від покладів.

Як свідчать результати дистанційних зйомок, розривні порушення та зони тріщинуватості є шляхами міграції ВВ і причиною утворення загазованості земної поверхні.

В даних дослідженнях автори використовували знімки отримані з космічних апаратів «Океан-О» (Україна), «Landsat-TM» (США), «Corona» (США), «Spot» (Франція), «Ресурс Ф2» (Росія), які охоплювали такі спектральні діапазони: 0.5—0.6, 0.6—0.7, 0.8—0.9 мкм (сканер МСУ-Є), 0.59—0.60, 0.61—0.68, 0.79—0.89 мкм, («Spot»), 0.46—0.51, 0.62—0.67, 0.64—0.69, 0.81—0.86 («Ресурс Ф2», МК-4, СА-М) та 0.4—0.7 мкм інтегральний з аерофотознімків масштабу 1:5000 та 1:17000.

Польові газогеохімічні дослідження виконувались за допомогою сучасного газового хроматографа ГХ-2000ДП. Цей прилад має високочутливий напівпровідниковий детектор і може реєструвати основні компоненти супутнього чи природного газу — метану, етану, пропану, бутану і пентану з чутливістю 10^{-6} %.

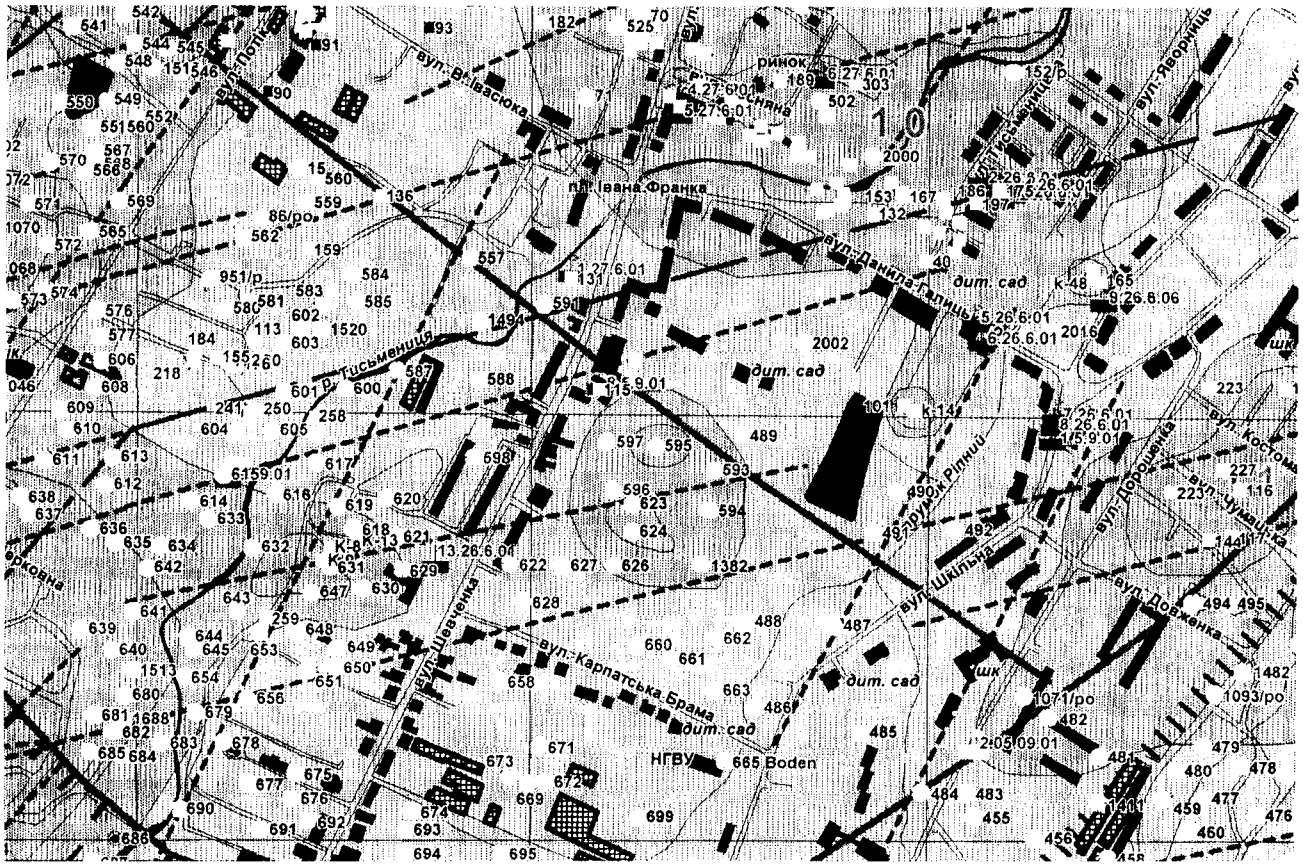
Інформативними параметрами є час утримання компонентів газу і співвідношення площ хроматографічних піків між ними, що вказує на склад того чи іншого газу. Співвідношення площ піків метан/етан, метан/пропан, метан/бутан для кожного родовища чи його блоків є постійним. Це і дозволяє визначати відмінність одного газу від іншого, в тому числі природного від біологічного, транспортного, магістрального.

Відбір проб здійснюється з поверхні грунту, асфальту інших земних поверхонь автономним електроаспіратором за допомогою напівпровідникового приладу ТГП-1 у моніторинговому режимі. Хроматограф здійснює ідентифікацію побіжного газу.

Особливістю використання хроматографа є те, що його метод відноситься до розряду абсолютних за якісними параметрами. Тому наявність інших газів у місті — відпрацьованих автомобільних, біо-, фекальних і т. д. не є завадою. Для кожного пункту з виявленим аномальним газовим потоком роздруковується хроматограма, на якій зазначені основні компоненти: метан, етан, пропан, бутан, їхнє співвідношення і порівняння зі зразком.

Особливе місце у процесі досліджень посідала робота з архівними матеріалами — детальне вивчення давніх картографічних матеріалів і текстів (датованих 20—30 роками минулого століття), опізнання та надійна прив'язка до космофотооснови ліквідованих свердловин і колодязів.

В цілому проведені дослідження дозволили створити космофотокарту міста Борислав у масштабах 1:5000 — 1:10000. На рисунку представлено фрагмент цієї карти, де показані потенційні і фактичні джерела підвищеної концентрації природного газу, пункти заміру його концентрації і відбору проб, лінійні зони підвищеної тріщинуватості, ареали підвищеної концентрації природного газу у приземному шарі атмосфери (рисунок). Цифрову карту виконано у ГІС «MapInfo». Вона складається з декількох шарів, які можна об'єднати у такі групи:
— фактичні дані (3 шари — свердловини, шурфи, колодязі, пункти заміру концентрацій і відбору проб газу);
— інтерпретаційні дані, тобто ареали газового забруднення (3 шари);



Фрагмент космофотокарти м. Борислав

— геологічні дані (2 шари — розривна тектоніка за геологічними даними і результати вивчення аерокосмічних знімків);
— топографічні дані (3 шари — вулиці та окремі будинки, гідромережа, топоніміка);
— топогеодезичні дані (1 шар — кілометрова мережа);
— аерокосмічні дані (трансформовані і аеровисотні та космічні фотозображення, приведене до даної геодезичної проекції).

Характеризуючи в цілому стан забруднення приземного шару атмосфери міста газоподібними вуглеводнями природного походження, відмітимо, що майже вся його територія загазована, особливо ділянки найщільнішої забудови. Загальна площа забруднення за нашими даними становить біля 20 км^2. На фоні загальної загазованості виділяються 14 аномальних ділянок різної конфігурації, які характеризуються вищими (порівняно з фоном) рівнями концентрації газу. Їхня площа більша ніж 4 км^2. У розміщенні і формі аномальних ареалів спостерігається доволі чітко виражена поперечна зональність, по відношенню до простягання карпатських структур, яка, на нашу думку, пов'язана з розривними порушеннями цього напрямку. Більше того, територіально розміри та межі ареалів загазованих ділянок контролюються щільністю малоамплітудних розривів (зон розущільнення гірських порід), невідомих у геологічній літературі, вперше виявлених авторами при дешифруванні аерокосмічних матеріалів. Тобто, можемо відмітити, що на сучасному етапі активнішими, «розкритішими» є поперечні дислокації. Інший вид тектонічних розривів, що контролює ареали загазованості — насуви, зокрема Береговий, що проходить по західних околицях міста.

Проведені нами роботи дозволили виявити і зафіксувати на картографічних та аерокосмічних матеріалах понад 370 ліквідованих шурфів-колодязів. Значна частина виявлених шурфів-колодязів має більш як сторічний вік, їх споруджено до 1897 року. Найбільша концентрація гірських виробок спостерігається в районі озокеритового родовища (Comp. Commerc, Francaise, Grupa II, а також

Galic. Bank Kredytowy). Це широковідомий факт. Зараз майже всі ці шурфи перекриті відвалами пустої породи з озокеритових шахт.

Зіставлення карт загазованості станом на 2000 і 2001 рік свідчить про те, що розповсюдження природного газу у повітряному басейні міста — складний динамічний процес. По-перше, картина загазованості змінюється під впливом природних умов, зокрема залежно від пори року, атмосферного тиску, температури, переважного напрямку та швидкості вітру, від геологічних процесів — циклів, згідно з якими одні тектонічні розриви «закриваються», інші — «відкриваються; по-друге, залежно від техногенних факторів: у першу чергу від заходів з дегазації, що проводяться Відкритим акціонерним товариством (ВАТ) «Укрнафта Бориславнафтогаз» та особливостей технології нафтодобутку.

Таким чином, в результаті виконаної роботи було створено карти джерел забруднення приповерхневого шару атмосфери м. Борислав газоподібними ВВ природного походження. Одночасно ці картографічні матеріали відобразили загальну картину розповсюдження природного газу у повітряному басейні станом на вересень 2001 року. На картах зафіксовано діючі та потенційні джерела природного газу: 1399 діючих і ліквідованих свердловин, 374 ліквідованих шурфів та нафтових колодязів, мережа розривних порушень.

Вважаємо, що створені карти є значним кроком уперед у галузі вивчення джерел і загальної картини загазованості міста.

Закладено основу ГІС загазованості м. Борислав.

Отримані результати свідчать про високу ефективність комплексного використання аерокосмічного та польового газогеохімічного методів при вивченні загазованості території Бориславського нафтогазового родовища і дозволяють рекомендувати подальші роботи подібного напряму з метою отримання детальніших даних в межах Бориславської міської агломерації, а також на інших нафтових і газових родовищах.

1. Аксенов А. А., Багдасарова М. В., Довжок Е. М. Бориславское нефтяное месторождение — пример разгрузки глубинных флюидных систем по тектоническим нарушениям // Пластовые давления в нефтегазоносных провинциях: Науч. тр. ин-та геол. и разраб. горючих ископаемых. — М., 1982.—С. 70—81.
2. Бойко Г. Е., Мырка Я. И, Мизик Р . С., Михалевич Л. В. К исследованию режима газонефтепроявлений на территории Бориславского месторождения // РМС «Геология и геохимия горючих ископаемых». — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 16—21.
3. Контроль загазованности атмосферы на объектах газовой промышленности. — М.: ВНИИЭгазпром, 1979.—Вып. 4.—50 с.
4. Мырка Я. М. Опыт изучения и устранения загазованности на территории Бориславского и Битковского нефтегазовых месторождений //Проблемы развития нефтяной промышленности Украины и Белоруссии: Сб. науч. тр. — Укргнпрониинефть, 1985.—С. 77—84.
5. Tolwinski K. Kopalnie nafty i gazow ziemnych w Polsce. Boryslaw T.II. Warszawa-Boryslaw-Lwow, 1934—1937.—381 p.

Океанологічні задачі

Использование данных SeaWiFS для наблюдения Черного моря

Г. К. Коротаев, В. С. Суетин, В. В. Суслин, С. Н. Королев, А. А. Кучерявый

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

Запущенный в космос в 1997 году американский оптический сканер SeaWiFS производит регулярные наблюдения морских акваторий в нескольких режимах в широкой полосе обзора [7]. Излучение регистрируется в восьми спектральных интервалах шириной 20—40 нм, расположенных в диапазоне длин волн 412—865 нм. Получаемая информация полезна для решения различных задач — от выполнения глобального экологического мониторинга до изучения локальных процессов в отдельных морях или прибрежных участках. В принципе по результатам измерений излучения в ряде спектральных интервалов можно вычислять концентрацию хлорофилла и значения других важнейших параметров,

© Г. К. КОРОТАЕВ, В. С. СУЕТИН, В. В. СУСЛИН, С. Н. КОРОЛЕВ, А. А. КУЧЕРЯВЫЙ, 2002

определяющих оптические свойства воды в море [3—5, 7—10, 12].

Рис. 1 иллюстрирует результаты картирования концентрации хлорофилла $a(C_a)$ в Черном море, определенной по стандартному алгоритму NASA при оперативной обработке данных SeaWiFS в глобальном масштабе. Такие карты несут информацию о многих важных процессах, протекающих Черном море. В Морском гидрофизическом институте НАН Украины формируется региональный компьютерный архив, содержащий как исходные данные съемок прибором SeaWiFS, так и результаты их стандартной обработки по акватории Черного моря. Одно из основных ограничений для наблюдения моря в видимом диапазоне связано с облачным покровом, тем не менее, благодаря непрерывной работе на орбите и широкой полосе обзора прибор SeaWiFS дает возможность почти регулярного наблюдения изменений оптических свойств воды в Черном море, особенно в летний сезон.

Второе ограничение связано с точностью количественного определения концентрации хлорофилла *a* в морской воде. Как показали выполненные исследования, результаты расчетов C_a по стандартному алгоритму NASA в ряде случаев содержат большие погрешности [3]. Одной из причин их возникновения является отличие оптических свойств воды в Черном море от океанских вод, для которых предназначен этот алгоритм. По-видимому, это ограничение может быть преодолено путем применения более сложных многопараметрических алгоритмов расчета C_a с использованием измерений по полному набору спектральных каналов прибора SeaWiFS [4, 10, 12]. Однако для реализации таких алгоритмов необходимо точное выполнение атмосферной коррекции и определение величин нормализованной спектральной яркости воды $L_{WN}(\lambda)$ для всех длин волн λ измерений SeaWiFS. Вместе с тем, по многим признакам достоверность результатов атмосферной коррекции для спектральных каналов SeaWiFS с λ = 412 и 443 нм вызывает серьезные сомнения [3, 6]. Например, в ряде случаев получаемые по стандартным алгоритмам значения $L_{WN}(412)$ и $L_{WN}(443)$ оказываются отрицательными (рис. 2). С этим связано еще одно ограничение в применении данных SeaWiFS для наблюдения Черного моря. Таких же явных признаков ошибок в определении $L_{WN}(510)$ и $L_{WN}(555)$ не наблюдается, поэтому представляется целесообразным прежде всего на практике использовать результаты определения этих двух величин. При этом мы исходим из того, что ошибки атмосферной коррекции в наибольшей мере проявляются в синем участке видимого диапазона, а с увеличением длины волны до 510 и 555 нм они существенно уменьшаются. В этом проявляется региональная специфика аэрозоля над акваторией Черного моря.

На рис. 3 показаны зависимости $L_{WN}(555)$ и некоторых других параметров от времени за период с мая по август 1998 г. Нанесенные на этих графиках значения получены путем усреднения по площади в пределах участка 42.5—43.0° с.ш.; 30.3—31.0° в.д. На рис. 4 приведены характерные примеры пространственного распределения $L_{WN}(555)$ в различные дни летом 1998 г. Приведенные на рис. 3 и 4 примеры демонстрируют особенности пространственно-временной изменчивости $L_{WN}(555)$ в Черном море. Характерный интервал изменений составляет 0.3—3 мкВт·нм$^{-1}$ср$^{-1}$см$^{-2}$. Столь сильная изменчивость обусловлена особенностями развития кокколитофорид, приводящих к повышению показателя обратного рассеяния света [1]. Наибольшие значения $L_{WN}(555)$ наблюдаются в июне в центральной и юго-западной частях моря, а также в узкой полосе вдоль Анатолийского побережья. В июле и августе это явление существенно ослабевает. Сильные эффекты рассеяния света в период цветения кокколитофорид почти по всей площади моря относятся к одной из специфических особенностей современного состояния Черного моря. До второй половины 1980-х годов этого не наблюдалось. В связи с этим величина $L_{WN}(555)$ содержит полезную информацию, отражая достаточно важные эффекты изменчивости свойств Черного моря.

Для анализа информативности съемок в канале 510 нм полезно вместо $L_{WN}(510)$ рассматривать отношение $I_{510} = L_{WN}(555)/L_{WN}(510)$, которое в первом приближении отражает эффекты поглощения света в морской воде [5, 8]. В работе [3] предложено использовать эту величину для расчетов концентрации хлорофилла *a* в Черном море в летний сезон по формуле

$$C_a = 1.13(I_{510})^{3.33}. \qquad (1)$$

На рис. 5 показаны примеры построенных с применением формулы (1) карт пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* в западной части Черного моря. Наиболее высокие значения C_a наблюдаются в районе выноса Дунайских вод и наименьшие — на большой площади в глубоководной части моря. Легко видеть, что в интервале изменений $0.2 \le C_a \le 1.6$ мг/м^3 на этих картах отчетливо прослеживается имеющая сложную структуру граница между глубоководной частью моря и шельфом с различными оптическими свойствами воды. В течение лета расположение и конфигурация этой границы претерпевает значительные изменения, отражая особенности морских

Рис. 1. Примеры карт пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* в Черном море по данным SeaWiFS

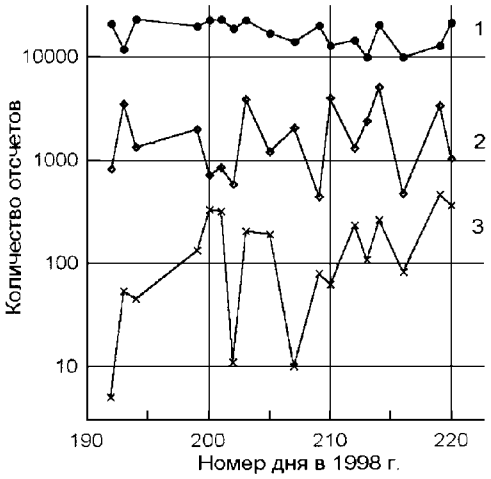


Рис. 2. Результаты анализа серии карт величин $L_{WN}(412)$ и $L_{WN}(443)$ в западной части Черного моря в период с 11 июля по 8 августа 1998 г.: *1* — полное количество свободных от облаков узлов сетки на карте; *2* — количество узлов с отрицательными $L_{WN}(412)$; *3* — количество узлов с отрицательными $L_{WN}(443)$

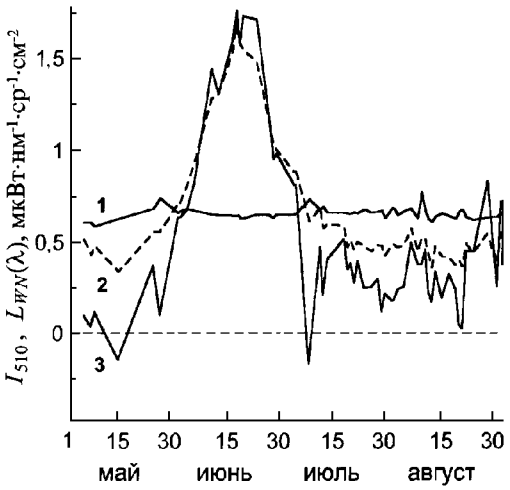


Рис. 3. Изменения величин I_{510} и $L_{WN}(\lambda)$, в выделенном участке Черного моря за период с мая по август 1998 г.: *1* — I_{510}, *2* — $L_{WN}(555)$; *3* — $L_{WN}(412)$

течений, процессов перемешивания вод, развития фитопланктона и т. п. Таким образом, величина I_{510} тоже является весьма информативной. Интересно отметить, что на картах величин $L_{WN}(555)$ и I_{510} наблюдается независимая изменчивость, говорящая о том, что эффекты рассеяния и поглощения света в море, вообще говоря, определяются разными факторами. Что же касается вопроса о точности определения C_a в количественном смысле, для получения уверенного ответа на этот вопрос еще требуются специальные исследования.

Формула (1) связывает C_a с двумя измеряемыми величинами $L_{WN}(\lambda)$, λ = 510, 555 нм, но число переменных факторов, определяющих изменения $L_{WN}(\lambda)$, по меньшей мере равно трем: поглощение света планктоном и желтым веществом и рассеяние частицами взвеси. Поэтому, вообще говоря, ни одна формула вида (1) не способна обеспечить однозначное определение C_a без того, чтобы в реальности выполнялись некоторые дополнительные условия, ограничивающие вариации этих факторов. Кроме того, для определения хлорофилла при не слишком высоких его концентрациях использование канала 510 нм является несколько необычным в связи с тем, что для длин волн 510 и 555 нм большие числовые значения имеет показатель поглощение света составляющей чистой морской воды, и поглощение фитопланктоном здесь играет второстепенную роль. Как известно, максимум поглощения света фитопланктоном расположен около λ = 443 нм, и обычно считается, что это и есть наиболее эффективный участок спектра для определения C_a [5]. В стандартном алгоритме NASA для этого используется канал 490 нм [9].

Для того чтобы лучше понять физический смысл механизмов, предопределяющих высокую информативность величины I_{510}, полезно выполнить модельный анализ рассматриваемой задачи. Подробнее этот анализ описан в работах [2, 11], здесь же мы лишь кратко изложим наиболее важные выводы. Моделируются изменения величин $L_{WN}(555)$ и I_{510} в зависимости от трех первичных параметров, от которых зависят оптические свойства воды в Черном море в летний сезон. Следуя [4], в качестве параметров берутся C_a, $a_g(510)$ и $b_{bp}(555)$ — концентрация хлорофилла, показатель поглощения света желтым веществом при λ = 510 нм и показатель обратного рассеяния света частицами взвеси при λ = 555 нм. При этом вычисляются и сопоставляются показатели поглощения света желтым веществом $a_g(\lambda)$ и фитопланктоном $a_{ph}(\lambda)$ для всех длин волн видимого диапазона.

Выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

Формула (1) выполняется при условии, что вариации величины I_{510} в первую очередь определяются изменениями $a_g(510)$, и при этом между C_a и a_g реализуется такая связь:

$$a_g(510) = 0.057C_a - 0.003. \qquad (2)$$

При этом $a_g(\lambda)$ превышает $a_{ph}(\lambda)$ почти в три раза для всех λ из участка 400—555 нм. В этом заклю-

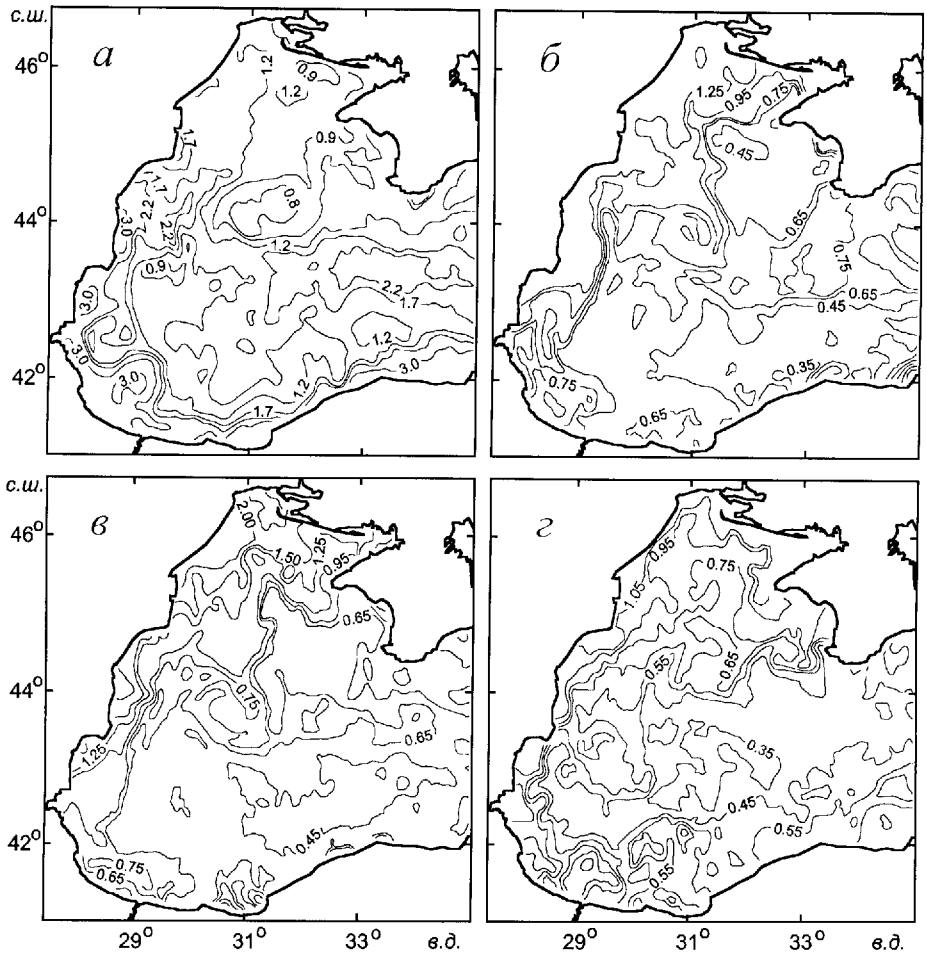


Рис. 4. Пространственное распределение $L_{WN}(555)$, мкВт·нм$^{-1}$ср$^{-1}$см$^{-2}$ в западной части Черного моря: *а* — 16.06.98, *б* — 13.07.98, *в* — 19.07.98, *г* — 19.08.98

чается одно из важных отличий оптических свойств воды в Черном моря от океана, и именно в этом состоит причина того, что алгоритм NASA в Черном море приводит к завышенным оценкам C_a. Этот вывод согласуется с полученной в работе [4] оценкой предельного условия работоспособности алгоритма NASA: $a_g(443)/a_{ph}(443) < 2$.

Вообще говоря, нельзя исключать возникновения ситуаций, в которых жесткой связи между C_a и a_g не будет, и тогда формула (1) может оказаться плохо пригодной для определения C_a. Вместе с тем, если не ставить задачу определения концентрации хлорофилла, то в качестве информативной характеристики можно рассматривать величину I_{510}. Прямые численные оценки в рамках использованной модели показывают, что при независимых изменениях параметров в типичных для Черного моря пределах (независимо от того, существует ли жесткая связь между C_a и a_g или нет) с хорошей точностью выполняется следующая формула, выражающая суммарное значение поглощения света планктоном и желтым веществом

$$A_\Sigma(510) = a_g(510) + a_{ph}(510):$$
$$A_\Sigma(510) = 0.0823(I_{510})^{3.41}. \quad (3)$$

Если C_a и a_g изменяются независимым образом, то вычислять C_a через I_{510} нет смысла, но при этом остается возможность определения величины $A_\Sigma(510)$. Исходя из этого, приведенные на рис. 5 карты C_a можно рассматривать как результат формального преобразования по формуле (1) соответствующих карт I_{510}, допустимого даже если в реальности эта формула не выполняется. И тогда с точностью до выбора шкалы измерений приведенные на рис. 5 примеры карт C_a можно рассматри-

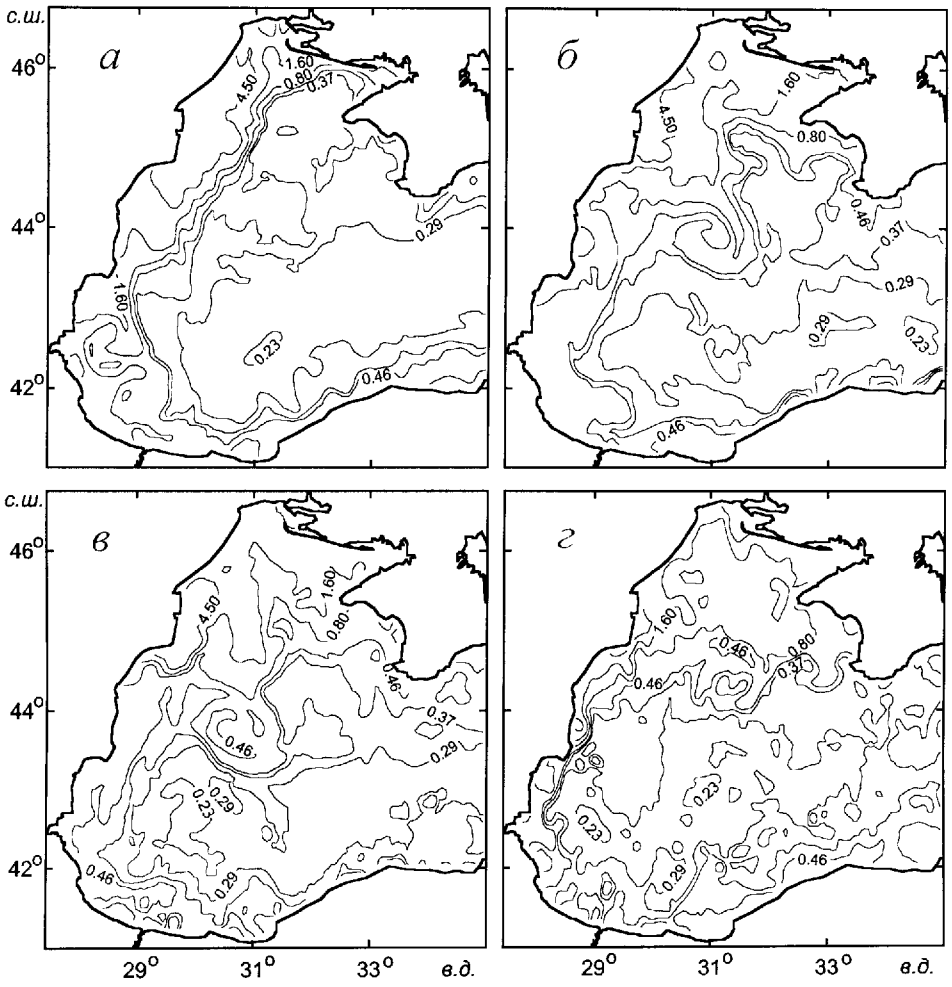


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации хлорофилла C_a, мг/м^3 в западной части Черного моря: *а* — 16.06.98; *б* — 13.07.98; *в* — 19—20.07.98; *г* — 19.08.98

вать так же, как и карты пространственного распределения суммарного поглощения $A_\Sigma(510)$.

На основе выполнения серии модельных расчетов получилось следующее выражение:

$$b_{bp}(555) = [9.3L_{WN}(555) - 1.0] \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

С учетом аппроксимации (4) приведенные на рис. 4 карты $L_{WN}(555)$ в первом приближении допустимо интерпретировать как карты распределения $b_{bp}(555)$.

Формулы (3) и (4) демонстрируют ведущие физические механизмы, определяющие информативность величин I_{510} и $L_{WN}(555)$. В целом выполненный анализ говорит о том, что несмотря на существенную ограниченность возможностей определения полных спектров $L_{WN}(\lambda)$ по данным SeaWiFS, измерения в двух каналах 510 и 555 нм позволяют прослеживать интересные особенности пространственно-временной изменчивости характеристик поглощения и рассеяния света в море. В летний сезон основной вклад в изменения поглощения дает желтое вещество, а определение концентрации хлорофилла имеет смысл только при условии выполнения достаточно жесткой связи между C_a и a_g.

1. Маньковский В. И., Владимиров В. Л., Афонин Е. И. и др. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х начале 90-х годов. — Севастополь. 1996.—32 с.—(Препринт / НАН Украины. Мор. гидрофиз. ин-т).
2. Суетин В. С., Суслин В. В., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофиз. журн.
3. Суетин В. С., Суслин В. В., Кучерявый А. А. и др. Особенности интерпретации данных дистанционных оптических наблюдений Черного моря с помощью прибора SeaWiFS // Морской гидрофиз. журн.—2001.—№ 2.—С.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 227—230

71—80.
4. Burenkov V. I., Kopelevich O. V., Sheberstov S., et al. Bio-optical characteristics of the Aegean Sea retrieved from satellite ocean color data // The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems / Eds P. Malanotte-Rizzoli, V. N. Eremeev. — Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1999.—P. 313—326.
5. Gordon H. R., Clark D. K., Brown J. W., et al. Phytoplankton pigment concentration in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determination and CZCS estimates // Appl. Opt.—1983.—**22**, N 1.—P. 20—36.
6. McClain C. R., Barnes R. A., Eplee R. E., et al. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Part 2 // NASA Technical Memo. 2000-206892.—2000.—**10**.—57 p.
7. McClain C. R., Cleave M. L., Feldman G. C., et al. Science quality SeaWiFS data for global biosphere research // Sea Technology.—1998.—**39**.—P. 10—16.
8. Morel A. In-water and remote measurements of ocean color // Boundary.—Layer Meterol.—1980.—**18**.—P. 177—201.
9. O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchell B. G., et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res.—1998.—**103**.—P. 24937—24953.
10. Roesler C. S., Perry M. J. In situ phytoplankton absorption, fluorometric emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance // J. Geophys. Res.—1995.—**100**.—P. 13279—13294.
11. Suslin V. V., Suetin V. S., Kucheryaviy A. A., Korolev S. N. Possibilities of the Black Sea bio-optical characteristics estimation from SeaWiFS data // Proc. Intrnat. conf. «Current problems in Optics of Natural Waters: ONW-1» St.-Peterburbg, Russia, Sept 25-28, 2001. — St.-Peterburbg, 2001.—P. 222—227.
12. Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters // Appl. Optics.—1994.—**33**, N 12.—P. 2369—2378.

Космический эксперимент «Мониторинг морских акваторий»

Г. К. Коротаев[1], В. В. Малиновский[2], В. В. Пустовойтенко[2], Л. Н. Радайкина[1], С. В. Станичный[1]

[1]Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь
[2]ООО ДВС-ЛТД, Севастополь

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов, протекающих в океанах и морях, а так же в атмосфере над ними, на основе данных дистанционного зондирования начато практически запуском первых космических аппаратов (КА) и орбитальных станций. Первоначально для этого использовались визуальные и фотографические наблюдения. В последующем были созданы обширный инструментальный парк средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и специализированные КА: метеорологические, океанографические, исследования природных ресурсов и т. д. К их числу относятся КА типа NOAA, «Nimbus», SEASAT, ERS, SeaSat, многие КА серии «Космос», «Ресурс», «Океан» и др.

Приход космических средств и методов в морские науки придал им новые качества. Во-первых, появилась возможность наблюдения в реальном времени или с небольшой задержкой любых регионов Мирового океана. Во-вторых, появилась возможность перейти на новый уровень изучения процессов, протекающих в морях и океанах — на уровень изучения целостных образов этих процессов. Наконец, современные радиолокационные средства ДЗЗ позволяют наблюдать процессы независимо от условий освещенности, времени года и местных погодных условий.

В 70—90 годы XX века в отечественной спутниковой океанологии развивались и поддерживались исследования, долговременная цель которых состояла в реализации непрерывного мониторинга Мирового океана на основе использования спутниковой информации и информации, получаемой на гидрологических разрезах, выполняемых в рамках программы «Разрезы» [6]. Эти работы начаты запуском океанографических КА «Космос-1076, -1151», в последующем продолжены запуском КА «Космос-1500, -1602» и др. Основные итоги этих работ обобщены в [6—8]. Полученные результаты легли в основу создания целевой долговременной программы «Океан» [6].

Очевидно, что в современных условиях подобная глобальная программа, обеспечивавшая в те годы получение более половины общего мирового объема океанографических данных, вряд ли может быть реализована усилиями одной страны. Поэтому в последние годы акцент в использовании спутниковой информации смещен в пользу решения региональных задач. Работы в этом направлении на

© Г. К. КОРОТАЕВ, В. В. МАЛИНОВСКИЙ, В. В. ПУСТОВОЙТЕНКО, Л. Н. РАДАЙКИНА, С. В. СТАНИЧНЫЙ, 2002

Украине начаты запуском КА «Січ-1» [4] и продолжены в последующем запуском КА «Океан-О».

Морской гидрофизический институт НАН Украины, применяя многолетний опыт использования спутниковой информации при решении фундаментальных и прикладных задач физики моря, реализует в масштабах Черного моря прототип региональной космической наблюдательной системы [3]. При этом, наряду с использованием собственно спутниковой информации, предполагается широкое использование сопутствующей океанографической (океанологической) и метеорологической информации, а также информации, получаемой с помощью дрейфующих автоматических буйковых станций (дрифтеров) [5]. Предполагается, что источником оперативной спутниковой информации в рамках этой системы станет КА «Січ-1М» [1].

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «Січ-1М»

Космический аппарат «Січ-1М» создается на базе платформы, хорошо зарекомендовавшей себя при создании океанографических КА типа «Космос-1500, -1602», «Океан-01» и «Січ-1», и предназначен для оперативного сбора данных о состоянии Мирового океана и суши, передачи этих данных по радиоканалам на пункты приема Планируемый срок его запуска — 2003 г. [1].

Предполагается оснащение КА «Січ-1М» уникальным бортовым информационно-измери-тельным комплексом (БИИК), включающим в себя следующие комплексы ДЗЗ [1]:

— радиолокационную станцию бокового обзора (РЛС БО) с реальной апертурой антенны;

— сканирующий радиометр 8-мм диапазона РМ-08;

— многозональное оптико-механическое сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-М);

— многозональное оптико-электронное сканирующее устройство высокого разрешения (МСУ-ЭУ);

— оптико-микроволновый сканер МТВЗА-ОК с блоками СВЧ-, видимого и ИК-диапазонов.

КА оснащается также аппаратурой для исследования электрофизических характеристик ионосферы «Вариант» и аппаратурой спутниковой навигации (АСН).

Отличительной особенностью КА «Січ-1М» является использование для передачи информации бортовых радиолиний, работающих в частотных диапазонах 137 МГц, 1.7 и 8.2 ГГц, позволяющих принимать информацию практически всему мировому парку станций приема спутниковой информации. Это, безусловно, позволяет удовлетворить потребности как отечественных, так и зарубежных потребителей космической информации.

Другой особенностью КА «Січ-1М», в сравнении с предшествовавшими ему КА аналогичного класса, является расширение ширины полосы обзора РЛС БО. Это, безусловно, расширяет ее возможности РЛС БО при наблюдении морских акваторий и таких опасных гидрометеорологических образований, как тайфуны (речь идет о наблюдении проявления тайфунов и других опасных гидрометеорологических образований на морскую и океанскую поверхность).

Суммарные затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию в течение года системы «Січ-1М» оцениваются в 18 млн долл. США, в то время как стоимость системы аналогичного класса NOAA оценивается в 100 млн долл. США [2]. Другими словами, космическая наблюдательная система, построенная на основе КА «Січ-1М», обладает экономической эффективностью на мировом рынке космических технологий. Немаловажным фактором, повышающим ее эффективность, является то, что ведущие научные организации Украины, занимающиеся вопросами использования информации ДЗЗ в области морских наук и технологий, имеют многолетний опыт работы с космической информацией и соответствующие наработки методического и программно-математического обеспечения первичной и тематической обработки данных. К их числу прежде всего относятся МГИ НАН Украины, ЦРЗЗ НАНУ—НКАУ им. А. И. Калмыкова, ЦАКИЗ и ряд других.

Имеющийся опыт показывает, что на основе использования спутниковой информации, получаемой с помощью КА класса «Січ-1М», в том числе радиолокационной, возможна оценка многих характеристик морской поверхности, приводного слоя атмосферы и ледового покрова, определяющих состояние морских экологических систем, а также экологических систем в зоне сопряжения «суша—море». К их числу относятся: интенсивность волнения (положение штормовых областей); скорость и направление ветра в приводном слое атмосферы; положение морских температурных фронтальных зон; параметры морских и атмосферных внутренних волн; положение, конфигурация ледовых полей и сплоченность льда в них; влагозапас и водность облачности и ряд других [6—8].

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «МОНИТОРИНГ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ»

Космический эксперимент (КЭ) «Мониторинг морских акваторий» направлен на получение данных о состоянии морских акваторий и их прибрежных областей с целью информационного обеспечения решения фундаментальных и прикладных задач

физики моря по таким основным направлениям:

— мониторинг топографии морских акваторий;

— мониторинг параметров поля ветра над морскими акваториями;

— мониторинг поля температуры морской поверхности;

— мониторинг параметров ледового покрова на морских акваторий (концентрация, дрейф и размеры ледовых полей);

— решение задач в области морской биологии и экологии.

Измерения перечисленных параметров в своей совокупности дают исходные данные для расчета и прогноза циркуляции, первичной продукции, продукции рыбных ресурсов и граничных условий для прогноза погоды и климатических изменений, оценки экологического состояния морских акваторий и т. д.

Выполнение КЭ позволит развить методики тематической интерпретации информации, получаемой с помощью средств ДЗЗ отечественной космической наблюдательной системы «Січ» и на этой основе:

— апробировать методики оперативного мониторинга циркуляции вод в Черном море по данным спутниковых измерений, получить данные о региональных особенностях поля ветра и волнения в Азово-Черноморском бассейне и в восточном Средиземноморье и изучить особенности радиолокационной наблюдаемости морских температурных фронтальных зон в различных гидрометеорологических условиях;

— в квазиоперативном режиме выявить вероятные источники загрязнения прибрежной области Черного моря, определить вероятные пути переноса загрязнений оценить степень антропогенного воздействия на его прибрежную область;

— сформулировать рекомендации по комплексному использованию спутниковой и сопутствующей информации в системе регионального и глобального мониторинга поля ветра в приводном слое атмосферы над морскими акваториями и по использованию спутниковых данных в системе обеспечения безопасности мореплавания в Азово-Черноморском бассейне и Восточном Средиземноморье.

— получить теоретические и экспериментальные оценки точности регрессионного алгоритма определения ТПО и параметров скорости ветра с использованием поляризационных и поляризационно-спектральных измерений аппаратуры МТВЗА-ОК и отработать элементы эксплуатационной методики определения ТПО и параметров поля ветра в регионе Северной Атлантики по данным дистанционных измерений аппаратуры МТВЗА-ОК и РЛС БО КА «Січ-1М» и сформулировать рекомендации по оптимизации спектрального состава каналов спутникового СВЧ-зондировщика атмосферы;

— провести комплексную съемку приантарктического района (района антарктической станции «Академик Вернадский»), определить фактическое положение ледовой кромки в контролируемом районе и получить данные по динамике ее перемещения, получить данные о реальной ледовой обстановке непосредственно в районе нахождения станции и выработать рекомендации по использованию спутниковой информации в интересах решения задач физики моря, характерных для приантарктического региона, и обеспечения безопасности мореплавания в этом регионе.

В процессе выполнения КЭ, наряду с использованием данных, получаемых с помощью комплекса ДЗЗ КА «Січ-1М», предполагается широкое использование доступных данных, получаемых с помощью комплексов дистанционного зондирования других КА (NOAA, ENVISAT, TOPEX/POSEIDON и др.), а также доступных гидрометеорологических и гидрологических (контактных) данных. Для этого будут широко использоваться возможности технических средств МГИ НАН Украины (HRPT- и APT-станции приема спутниковой информации, станции приема факсимильной и первичной гидрометеорологической информации и др.), возможности получения необходимой информации по сети Интернет, а так же возможности получения информации, обеспечиваемые участием института в международных морских и космических программах.

Основными районами, наблюдение которых предполагается осуществить в ходе выполнения КЭ, являются:

— Черное и Азовское моря, моря восточного Средиземноморья, Мраморное и Эгейское моря;

— Северная Атлантика, течение Гольфстрим, пролив Ла-Манш;

— Антарктида и приантарктический район.

Черное и Азовское моря и моря Восточного Средиземноморья являются традиционной МГИ НАН Украины областью спутникового мониторинга.

Северная Атлантика также является регионом Мирового океана, входящим в сферу научных интересов МГИ НАН Украины. Институт располагает обширным фактическим материалом об основных гидрологических и океанографических параметрах, характеризующих этот регион. Его регулярные спутниковые наблюдения начаты запуском КА «Космос-1076, -1151» и продолжены запуском КА «Космос-1500, -1602» и «Січ-1». Регион характеризуется наличием в нем энергоактивных зон, через Северную Атлантику проходит течение Гольфстрим. Район является своеобразной «кухней», оказывающей заметное влияние на климатические и погодные условия в европейских странах, в том числе — и в Украине. Район является источником

зарождения и развития опасных гидрометеорологических явлений, в частности ураганов и тайфунов.

Антарктида и приантарктический район представляет интерес и как один из динамически активных районов Мирового океана и как район нахождения полярной антарктической станции «Академик Вернадский».

Кроме непосредственного наблюдения интересующих районов с помощью средств ДЗЗ КА «Січ-1М» и сбора сопутствующей информации, в рамках КЭ предусматриваются контрольно-калибровочные измерения. Необходимость их проведения диктуется следующими обстоятельствами:

— методики тематической интерпретации спутниковой информации (в частности радиолокационной) еще далеки от совершенства, что в ряде случаев исключает возможность однозначной интерпретации получаемых данных;

— характеристики средств ДЗЗ подвержены изменениям, не поддающимся учету за счет использования внутренних калибровок аппаратуры.

Это требует для обеспечения достоверности и репрезентативности получаемой информации систематического измерения параметров информационного сигнала спутниковых комплексов ДЗЗ при наблюдении тестовых районов, характеристики которых стабильны.

Для РЛС БО такими тестовыми районами могут быть тропические леса Амазонки, пески пустыни Сахара и морские полигоны, на которых синхронно со спутниковыми наблюдениями осуществляется определение гидрометеорологических и океанографических характеристик акватории, влияющих на формирование радиолокационного сигнала. Для оптической аппаратуры такими тестовыми районами могут быть участки консервативных морских акваторий и т. д.

Общая методология организации и проведения контрольно-калибровочных работ подробно рассмотрена в работе [6]. Там же определены и основные задачи, контрольно-калибровочных измерений, в том числе:

— отработка методов и средств контрольно-калибровочных измерений;

— отработка методов и средств дистанционного зондирования морской (океанской) поверхности и атмосферы в строго контролируемых гидрометеорологических условиях;

— оценка качества функционирования бортовой аппаратуры ДЗЗ в процессе ее эксплуатации;

— оценка точности гидрофизических характеристик и восстановления измеряемых полей;

— организация метрологического обеспечения спутниковых средств ДЗЗ, а также средств контрольно-калибровочных измерений и ряд других.

В качестве одного из возможных контрольно-калибровочных полигонов (ККП) рассмотрен Черноморский КПП, полностью охватывающий акваторию Черного моря, и имеющий в своем составе разнообразные средства измерений, включая самолет-лабораторию АН-30, быстроходное судно типа «Комета».

Безусловно, в современных условиях организация сети ККП, на которых обеспечивался бы широкий спектр гидрологических и океанографических измерений в полном объеме, как это предусматривалось в [6], представляется весьма проблематичной. Вместе с тем при сужении круга задач вполне осуществимо выполнение необходимых измерений на ограниченный акваториях (мини-полигонах).

В рамках КЭ «Мониторинг морских акваторий» в качестве такого мини-полигона предусматривается использовать Морской экспериментальный полигон МГИ НАН Украины и имеющуюся на нем инфраструктуру. Полигон имеет в своем составе морскую экспериментальную платформу, оснащенную необходимым набором стандартной и оригинальной гидрометеорологической, гидрологической и океанографической аппаратуры, а также плавсредства, обеспечивающие возможность выполнения измерений на прилегающих к полигону участках морской поверхности.

1. Загорулько А. Н., Богомья В. И. Перспективы внедрения ГИС/ДЗЗ технологий в решении прикладных региональных задач // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь, 2001.
2. Зубко В. П. Дистанційне зондування Землі в космічній програмі України // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ, 1999.—С. 19—26.
3. Коротаев Г. К., Малиновский В. В., Мотыжев С. В. и др. Компоненты спутникового мониторинга Черного моря (вклад Украины в Black Sea GOOS). — Севастополь, 2001.—116 с.—(Препринт / МГИ НАН Украины).
4. Міжвідомча науково-прикладна програма використання інформації з космічного апарата для спостереження Землі «Січ-1». — Київ, 1995.—27 с.
5. Мотыжев С. В. Исследование поверхностной циркуляции в Черном море с помощью дрейфующих буев со спутниковой связью // Морской гидрофизический журн.—1998.—№ 6.—С. 65—71.
6. Нелепо Б. А., Коротаев Г. К., Суетин В. С. и др. Исследование океана из космоса. — Киев: Наук. думка, 1985.—168 с.
7. Нелепо Б. А., Терехин Ю. В., Коснырев В. К. и др. Спутниковая гидрофизика. — М.: Наука, 1983.—253 с.
8. Радиолокация поверхности Земли из космоса. — Л.: Гидрометеоиздат. 1990.—200 с.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 231—238

Подспутниковые наблюдения важнейших биооптических параметров в Черном море (новый подход)

Г. К. Коротаев, М. Е. Ли, Г. А. Толкаченко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

Одной из наиболее трудных и важных проблем приморских стран является проблема охраны окружающей среды и контроля состояния морских экосистем на основе эффективных средств наблюдений за экологическим состоянием водных бассейнов. Для Украины эта проблема особенно актуальна в связи с тем, что бассейн Черного моря является полузакрытым и, по существу, оторванным от Мирового океана системой многочисленных морей и узких проливов, а стоки крупных рек, протекающих по территории многих стран восточной Европы, выносятся в шельфовую зону Украины.

Оптические методы контроля состояния водоемов позволяют достаточно эффективно исследовать экологические проблемы водных бассейнов. Эти методы основаны на использовании спектральных различий поглощения, рассеяния и флуоресценции света такими оптически активными примесями водной среды, как фитопланктон, минеральная взвесь и растворенное органическое вещество. В настоящее время интерес к оптическим методам исследования природных вод значительно возрос благодаря интенсивному развитию спутниковой океанологии. Вызвано это тем, что на современном этапе развития спутниковых технологий получения и интерпретации изображений водных акваторий появилась реальная возможность создавать на их основе непрерывно действующие системы диагноза и контроля состояния морских экосистем.

Успешная многолетняя эксплуатация спектрометра МКС (ИСЗ «Интеркосмос-21») и сканера CZCS (ИСЗ «Nimbus 7») способствовала интенсификации исследований в этом направлении и стимулировала дальнейшее совершенствование сканеров цвета. В 1997 году на орбиту были запущены американский спутник SeaStar с уникальным по своим характеристикам сканером цвета нового поколения SeaWiFS и индийский спутник IRS-P3 с прибором MOS на борту. Запуском этих спутников положено начало проведению долгосрочной программы глобальных наблюдений цвета океана, с целью создания наблюдательной сети за состоянием морской биосферы.

Для совершенствования оптических моделей системы «океан-атмосфера» (и разработанных на их основе алгоритмов обработки и интерпретации спутниковой информации), данные спутниковых измерений необходимо регулярно сравнивать с данными непосредственных биооптических наблюдений с уровня поверхности океана. В связи с тем, что в настоящее время во многих ведущих центрах космических исследований принята долгосрочная программа возобновления глобальных наблюдений за цветом морей и океанов, назрела настоятельная необходимость выработки единых методик и требований к подспутниковым измерениям параметров водной среды. В результате работы рабочей группы проекта SeaWiFS были выработаны рекомендации для всех участников проекта SeaWiFS по перечню необходимых параметров измерений и предложения, которые намечают основные принципы и стратегию подспутниковых биооптических измерений, используемых для разработки алгоритмов и методов контрольно-калибровочных сравнений [9]. Предложения определяют величины, которые должны быть измерены с разумной точностью и содержат детальные требования к методикам и аппаратуре для натурных измерений и калибровок. Главные требования этого проекта состоят в том, чтобы добиться результирующей точности измерений выходящего из воды излучения не хуже 5 % и концентрации хлорофилла «а» для океанических вод порядка 35 % в течение пятилетнего периода работы спутника [8]. В качестве параметров, обязательных для подспутниковых гидрооптических измерений, рабочая группа предложила использовать абсолютные величины спектральных значений облученности и яркости как для прямого сравнения с аналогичными характеристиками, полученными из спутниковых данных сканера SeaWiFS, так и для

© Г. К. КОРОТАЕВ, М. Е. ЛИ, Г. А. ТОЛКАЧЕНКО, 2002

расчета производных параметров, необходимых для применения в биооптических алгоритмах.

Нужно отметить, что перечень характеристик предложен рабочей группой с учетом современного состояния биооптических измерений и возможностей их усовершенствования в ближайшее время. Поэтому требования к точности измерений для проекта SeaWiFS значительно выше, чем обычно принято в традиционной гидрооптике. Помимо этого, в число рекомендуемых параметров включены такие, которые еще не получили широкое распространение в океанологии. К их числу относятся такие, как угловое распределение яркости под водой и индикатриса рассеяния. Предложенный подход к проведению гидрооптических подспутниковых измерений требует от фотометров для измерений подводной облученности и яркости наличия столь высоких метрологических характеристик, что они на настоящее время недостижимы не только в экспедиционных условиях, но и в лучших стационарных метрологических лабораториях.

Реализация новой концепции подспутникового обеспечения космических сканеров цвета нового поколения потребовала пересмотра основных принципов и направлений, по которым создавалась аппаратура для гидрооптических исследований. Особенно тщательно исследовались возможности минимизации помех от взволнованной поверхности моря в зависимости от погодных условий и геометрии освещения. Связано это с тем, что высокую точность современных спектрофотометров для измерений световых потоков в море часто оказывалось невозможно реализовать из-за несоизмеримо больших методических погрешностей. С целью их уменьшения методы традиционных световых измерений в море были пересмотрены и приведены к такому виду, чтобы можно было осуществить переход от абсолютных измерений световых потоков к их сравнению в дифференциальном фотометре. При этом был реализован комплексный подход с использованием новейших достижений в области создания подводных датчиков световых измерений, сбора и обработки информации на основе применения специализированных микропроцессоров и компьютеров и разработки программного обеспечения.

Большой опыт работ по унификации методов и приборов для гидрооптических измерений, накопленный в отделе оптики и биофизики МГИ НАН Украины, позволил разработать соответствующие новым задачам унифицированные оптоэлектронные блоки и устройства и реализовать на их основе гидрооптические приборы самого различного назначения. По этому принципу был создан комплекс гидрооптических приборов, который успешно применялся во многих экспедициях на научно-исследовательских судах и океанографической платформе. В последние годы приборы комплекса были существенно модернизированы с таким расчетом, чтобы их характеристики соответствовали рекомендациям рабочей группы SeaWiFS, а набор измеряемых параметров был достаточным для применения в океанологических подспутниковых биооптических экспериментах. В варианте подспутникового обеспечения комплекс аппаратуры включает в себя приборы для измерений коэффициента яркости моря, интегральных характеристик ослабления подводного светового поля и относительного углового распределения яркости под водой. В состав комплекса включены также приборы для измерений спектрального показателя ослабления света и полярный нефелометр, способный измерять индикатрису рассеяния в очень широком диапазоне углов рассеяния — от долей градуса в направлении облучающего луча до углов вблизи 180°.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ МОРЯ

Спектрофотометр для измерений спектрального коэффициента яркости моря является одним из основных гидрооптических приборов при проведении океанологических подспутниковых экспериментов, поскольку позволяет решать разнообразные задачи подспутниковых оптико-биологических наблюдений. Один из наиболее совершенных приборов был разработан в отделе оптики и биофизики МГИ НАН Украины [3]. Он представляет собой универсальный спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря, позволяющий решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления. В приборе предусмотрена возможность одновременного измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения моря или яркости небосвода, нормированных на излучение падающей на поверхность моря спектральной облученности. Предусмотрена также возможность работы как с борта исследовательского судна на ходу, так и непосредственно с поверхности моря на гидрологических станциях. Для этого прибор снабжен дополнительными поплавками и подводным парусом, которые позволяют ему плавать по поверхности моря и отходить на достаточно большое расстояние от судна. Измерения, выполняемые в плавающем варианте, позволяют свести до минимума многие методические погрешности и получать контрольно-калибровочные данные с требуемой для решения биооптических задач точностью. Важно отметить, что измерения коэффициента яркости по предложенной схеме не требуют абсолютной калибровки, поскольку измеряемая величина является отношением световых потоков. Поэтому измерения можно осуще-

ствлять с помощью дифференциального фотометра, калибровка которого производится посредством диффузно рассеивающего экрана и нейтральных ослабителей. Применение дифференциального фотометра позволяет существенно повысить точность измерений, а использование простых и надежных средств калибровки (рассеивающий экран и нейтральные ослабители достаточно компактны и обладают хорошей стабильностью параметров) дает возможность проводить калибровку прибора в экспедиционных условиях.

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО СВЕТОВОГО ПОЛЯ

Традиционным и общепринятым методом определения таких интегральных параметров светового поля, как показатели вертикального ослабления, является вычисление их по данным измерений глубинного относительного хода облученностей и яркости восходящего излучения. Основным недостатком этого метода является сильная зависимость исходных величин облученностей от условий освещения и состояния поверхности моря. Несмотря на то, что во время измерений производится постоянный контроль величины падающего излучения по палубному датчику, а флуктуации облученностей от волнения усредняются, полностью скомпенсировать методические помехи не удается. Значительного уменьшения методических погрешностей от этих факторов удалось добиться путем применения дифференциального метода измерений [4]. Суть его состоит в том, что измерению подвергается разность логарифмов облученностей от двух косинусных коллекторов, разнесенных друг от друга на несколько метров по глубине. В этом случае измеряется непосредственно показатель вертикального ослабления облученности, а надобность в измерении абсолютных значений облученностей отпадает. Поэтому измеряемые величины показателей вертикального ослабления света становятся практически независящими от условий внешнего освещения, а флюктуации облученностей из-за поверхностного волнения значительно меньше сказываются на результатах измерений, и только лишь на небольших глубинах. Объясняется это особенностями распределения по глубине статистических характеристик флуктуаций подводной облученности.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ЯРКОСТИ

При натурных подспутниковых исследованиях проникновения света в море, особенно на мелководье, недостаточно применять только широко распространенные в настоящее время измерители подводной облученности. Во-первых, требования по точности к измерителям облученности настолько велики, что проблемы с качеством световых коллекторов с косинусной, полусферической или сферической характеристикой становятся весьма ощутимыми. Не меньшей проблемой является также необходимость разработки соответствующих способов определения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние иммерсионного эффекта и отклонение угловой характеристики световых коллекторов от заданного закона. Поэтому при натурных исследованиях проникновения света на мелководье необходимо привлекать принципиально новые методы измерений характеристик световых полей, позволяющие определять не только ослабление спектральной облученности с глубиной, но и точно знать структуру световых полей по всему профилю. Данные измерений этой важной характеристики позволяют получать не только весьма ценные сведения о структуре распределения лучистых потоков в воде, но и рассчитать все интегральные параметры подводного светового поля, определить коэффициенты диффузного ослабления и отражения, а также оценить значения некоторых первичных оптических характеристик вод.

Различными авторами было создано несколько конструкций морских измерителей углового распределения яркости под водой, которые, однако, не нашли широкого применения в гидрооптике. Из-за сложности конструкции эти приборы были громоздки, неудобны для работы в экспедиционных условиях, имели ограниченные возможности в скорости и количестве получаемой информации. В МГИ НАН Украины был предложен совершенно новый подход, позволяющий производить измерения углового распределения светового поля под водой без вращения громоздкого измерительного фотометра в вертикальном и азимутальном направлениях. Достигается это тем, что фотометр во время измерений остается неподвижным, а свет из разных направлений поступает к нему через два вращающихся зеркала осуществляющих непрерывное сканирование его линией визирования. Эти зеркала объединены оптико-механической системой в устройстве, основанном на принципе работы перископа. За счет этого удалось упростить процесс измерений и резко повысить скорость и количество получаемой информации, поскольку шаг сканирования может выбираться гораздо меньшим, чем это допускают приборы. Измерения яркости в различных направлениях осуществляются методом сканирования линией визирования, с помощью специальной перископической насадки, закрепляемой на неподвижном спектрофотометре [6]. За счет высокой инфор-

мативности такого метода измерений одновременно решается и сложнейшая проблема определения под водой угловых координат, поскольку сведения о них заложены в самом измеряемом световом поле. Сканирующий измеритель углового распределения яркости под водой может быть рекомендован для проведения тщательных интеркалибровочных измерений при проведении биооптических подспутниковых экспериментов. В этом случае можно провести совместные измерения одной и той же характеристики в одинаковых условиях с помощью сканирующего яркомера и обычного измерителя облученности. Затем данные расчетов по формулам использовать для обоснования результатов измерений измерителей облученности путем их сравнения.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВОД

В отличие от параметров светового поля, первичные оптические характеристики являются неизменными свойствами рассеивающей среды, не зависящими ни от условий освещения, ни от трансформации излучения в процессе его распространения в воде. Их знание существенно улучшает качество физической интерпретации данных подспутниковых измерений и позволяет совершенствовать методы решения обратных задач в оптике моря. Естественно, более полный набор первичных оптических характеристик позволяет разрабатывать более совершенные и физически обоснованные аналитические модели поля восходящего излучения и алгоритмы обработки биооптической информации.

Из первичных гидрооптических характеристик наиболее существенными для целей подспутникового обеспечения являются спектральный показатель поглощения и индикатриса рассеяния, а также производные от них характеристики, такие как спектральные показатели ослабления и рассеяния назад. Разработке методов измерений спектрального показателя поглощения в разное время было посвящено много работ, но до сих пор решить эту проблему с достаточной для практических нужд точностью пока не удается. Неоднократно предпринимались попытки использовать прямые методы измерений спектрального показателя поглощения морских вод. Наиболее распространенным является метод измерений с применением зеркальной отражающей трубы, внутри которой размещается исследуемая среда. Построенные по этому принципу приборы в последние годы стали находить практическое применение при гидрооптических исследованиях, но используют их лишь для приблизительных оценок спектрального поглощения морских вод. Большинство из существующих методов являются косвенными. Они основаны на измерении различных характеристик при прохождении светового излучения сквозь водную среду. Разработанный в МГИ НАН Украины метод основан на определении спектрального показателя поглощения по измерениям спектров коэффициента яркости водной среды [10]. Стимулом для разработки этого метода послужили работы по развитию средств дистанционного определения цвета океана. Обоснованием для его использования в океанологических и экологических исследованиях явилась возможность измерений с высокой точностью больших величин коэффициента яркости в тех спектральных участках, где значения показателя поглощения природных вод слишком малы для количественных определений. При использовании этого метода измерения спектральных коэффициентов яркости выполняются полевым измерителем коэффициента яркости моря (диапазон длин волн — 320...730 нм, спектральное разрешение — 10 нм). Определение спектров поглощения проводится с помощью итерационной процедуры. Для предварительного определения формы кривой спектрального поглощения используется функция, пропорциональная ожидаемому спектральному показателю обратного рассеяния света и обратно пропорциональная спектральному коэффициенту яркости моря. Путем сопоставления полученных функций с табличными значениями находятся спектры мнимой части показателя преломления, после чего рассчитываются действительные части этого показателя. Затем на основе теории Ми вычисляются спектры обратного рассеяния и поглощения.

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УГЛОВ

Наиболее полное представление о рассеивающих свойствах морской среды можно получить по измерениям индикатрис рассеяния света в возможно более широком диапазоне углов. Измерители индикатрис рассеяния весьма сложны и громоздки, поэтому чаще всего применяются для работы в лабораторных условиях. Кроме того, эти приборы не дают возможности измерять индикатрису рассеяния во всем диапазоне углов рассеяния, поэтому приходится пользоваться различными приборами отдельно для малых и больших углов, используя при этом разные методы измерений. До настоящего время не было прибора, который позволил бы с необходимой точностью измерять полную индикатрису рассеяния света. В то же время проведенные исследования показывают, что индикатрису необходимо измерять в возможно более широком диапазоне углов: от нескольких минут до 180°. В отделе оптики

и биофизики МГИ НАН Украины был разработан полярный нефелометр, в котором большинство из перечисленных выше недостатков существующих приборов удалось устранить [7].

Отличительной особенностью нового принципа измерений является то, что развертка по углу осуществляется по принципу работы перископа, путем вращения специальной стеклянной призмы, вокруг оси светоприемного устройства, перпендикулярной к плоскости сканирования и проходящей через центр рассеивающего объема. Вследствие этого осветитель и светоприемное устройство нефелометра остаются неподвижными в процессе измерений. Оригинальная перископическая форма призмы и строго подобранные ее размеры позволяют светоприемному устройству регистрировать рассеянное излучение практически во всем диапазоне углов, включая и измерение ослабления прямого пучка.

Наиболее трудной проблемой при измерениях индикатрис в малых углах является учет паразитного отражения и рассеяния на элементах оптической системы. В связи с этим в настоящее время наибольшее распространение получили так называемые малоугловые методы измерений. Принцип измерений индикатрис рассеяния малоугловым методом основан на облучении строго определенного объема рассеивающей среды пучком параллельного узконаправленного луча с последующим измерением распределения интенсивности прошедших через этот объем лучей в фокальной плоскости приемного объектива. Ввиду того, что в фокальной плоскости собирается не только измеряемое рассеянное морской средой излучение, но и значительно более интенсивное паразитное фоновое излучение и прямое ослабленное средой излучение, возникает проблема выделения весьма слабого сигнала на фоне засветки, превышающей полезный сигнал в 10^5 раз.

Основная идея разработанного в МГИ НАН Украины принципиально нового теневого метода измерений индикатрис в малых углах состоит в том, чтобы создать схему с настолько малой фоновой засветкой, чтобы можно было производить измерения рассеяния даже в области весьма малых углов. Для этого в оптической схеме перископическая призма размещена вне облучающего пучка света так, чтобы в направлении 0° ее боковая грань совместилась с краем этого пучка параллельно оптической оси всей системы. В этом случае во всем диапазоне углов от 0° до 180° ни один прямой луч не сможет попасть в приемный объектив, в то время как рассеянные лучи будут восприниматься без всяких помех. При нулевом угле крайний луч источника света будет скользить вдоль боковой грани, а все остальные прямые лучи пройдут мимо призмы. В результате призма всегда будет находиться в области тени луча, и в приемный объектив попадет только рассеянный водой свет. Для идеально параллельного пучка света, такая схема позволяет полностью избавиться от паразитной фоновой засветки. К сожалению, реальные источники коллимированного светового излучения сами имеют паразитные фоновые лучи, которые все же попадают в приемный объектив, но их интенсивность на несколько порядков меньше интенсивности фона от прямых лучей в малоугловом методе. Величина этого паразитного фона от источника света может быть уменьшена еще на несколько порядков за счет сужения ширины пучка до очень малых размеров при измерениях в малых углах.

Еще одной немаловажной проблемой в измерении полной индикатрисы рассеяния, является обеспечение оптимальных условий измерений обратно рассеянных лучей в углах в непосредственной близости от 180°. Обычно максимальный угол в обратном измерении ограничивался значением 170°. Этот угол в большинстве полярных нефелометров определялся габаритами источника света и приемника, поскольку они препятствовали возможности сблизиться, чтобы обеспечить измерения вблизи 180°. В приборах же, специально предназначенных для измерений обратного рассеяния от пучка света неограниченной длины, при приближении к 180° происходило резкое увеличение длины рассеивающего объема, вследствие чего возникала неопределенность в результатах измерений из-за влияния многократно рассеянных лучей. Проблема была решена путем ограничения длины рассеивающего объема до приемлемой оптимальной величины с помощью установки на пути лучей двух хорошо полированных поглощающих стеклянных пластинок под углом 45° к оптической оси. При такой схеме большая часть прямого излучения, падающего на полированные пластинки, полностью поглощается, поскольку из-за незначительной разницы в показателях преломления стекла и морской воды, отражается лишь несколько долей процента, а за счет большого количества отражений величина паразитного отраженного излучения для рассеяния назад уменьшается более чем в 10^9 раз. За счет этого величина фоновой засветки в обратном направлении была уменьшена до пренебрежимой. Незначительное влияние фона в такой схеме измерений ощущается только для экстремально чистых океанских вод, но и в этом случае ее легко учесть путем вычитания из общего сигнала.

Для предотвращения попадания в измерительную зону рассеянного солнечного света, рабочий объем нефелометра вместе с вращающейся призмой огражден со всех сторон световой ловушкой, выполненной в виде кюветы. Кювета составлена из двух усеченных конусных чаш из светопоглощающего материала, соединенных между собой большими

основаниями так, чтобы между ними оставалась круговая щель для прохождения внутрь окружающей воды. Размеры круговой щели и ее длина подобраны из условия, чтобы фоновая засветка эффективно подавлялась, в то время как исследуемая морская вода имела возможность свободно протекать между ними, чтобы обеспечить быструю полную сменяемость измеряемой воды в кювете. Хорошему обмену и тщательному перемешиванию воды в измерительном объеме содействует также вращение перископической призмы, которая в этом случае играет роль своеобразной мешалки. Помимо этого элементы световой ловушки предотвращают возможность появления бликов на поверхностях механических узлов и иллюминаторов осветителя и фотометрического блока. Для дополнительной защиты от паразитных отражений и рассеяний на элементах оптических систем внутри осветителя и фотометрического блока установлено несколько дополнительных экранирующих диафрагм.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТА

В качестве параметра, характеризующего меру ослабления света, удобно использовать показатель ослабления направленного излучения (прозрачность) морской воды. Для измерения этого параметра создано множество конструкций прозрачномеров, использующих различные виды оптических и фотоэлектрических схем. Почти все они основаны на применении базисного метода и измеряют ослабление пучка света, проходящего в среде определенное расстояние, задаваемое оптической базой прибора. Точность измерения показателя ослабления излучения по этому методу определяется в основном нестабильностью элементов фотоэлектрической схемы и такими геометрическими параметрами, как угол расходимости источника света, угол фотоприемника и длина оптической базы.

Для целей подспутникового обеспечения необходимо было разработать такую схему прозрачномера, которая, с одной стороны, обладала бы высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов, а с другой — обеспечивала возможность перемены оптической базы даже в полевых условиях. При разработке было найдено оригинальное решение [1], которое в дальнейшем было усовершенствовано применением автоколлимационной оптической схемы с триппель-призмой в качестве отражающего элемента [2]. Ход лучей в такой автоколлимационной схеме при различных ориентациях призмы относительно оси измерительного пучка света не изменяется. Поэтому можно плавно изменять длину оптической базы прозрачномера простым перемещением или перестановкой призмы вдоль оси пучка, поскольку юстировка прибора при этом не нарушается. Следовательно, появляется возможность практически неограниченно расширять диапазон измерения показателя ослабления излучения, поскольку даже в сильно отличающихся по своим оптическим свойствам средах удается производить их в оптимальных условиях с одинаковой относительной погрешностью.

При такой оптической схеме измеряемая среда заполняет пространство между иллюминатором и триппель-призмой, обладающей свойством в широких пределах, независимо от ее ориентации в пространстве, отражать излучение в направлении, строго противоположном падающему излучению. Из-за сильной вытянутости морских индикатрис рассеяния, углы зрения фотоприемника и расходимости пучка света получаются чрезвычайно малыми, что предъявляет очень высокие требования к постоянству юстировки прибора, к сохранению хода лучей при переходе из воздуха в воду.

Возможность легко изменять в широких пределах длину оптической базы прозрачномера позволяет решить и такую проблему, как получение абсолютных значений показателя ослабления излучения. Для этого достаточно провести измерения одной и той же среды для двух различных баз, в пределах которых происходит однократное рассеяние. В этом случае исчезает необходимость введения поправки на изменение коэффициента отражения поверхностей оптических деталей, соприкасающихся с морской водой, при погружении прибора в море. В настоящее время эта поправка рассчитывается теоретическим путем для каждой конкретной оптической схемы отдельно. Ввиду того, что величина поправки значительно превышает значение показателя ослабления чистой воды, неточность ее определения, зачастую является основной причиной неоправданно высокой аддитивной составляющей методической погрешности.

ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПИГМЕНТОВ ФИТОПЛАНКТОНА

Концентрацию хлорофилла и феофитина определяли по методике ИнБЮМ НАН Украины с помощью флуориметрического метода [5].

Для измерений интенсивности флуоресценции пигментов использовали флуориметр, собранный совместно с сотрудниками МГИ НАНУ на базе прибора СПЕКОЛ. Флуориметр снабжен первичным абсорбционным синим фильтром СС-8. В приборе имеется возможность использовать сменные вторичные флуоресцентные фильтры для различных пигментов. Для хлорофилла «а» применяли

красный фильтр КС-17. Погрешность измерений составляет 1 %. Порог чувствительности по хлорофиллу — 0.04 мкг/л. Калибровку прибора производили по химически чистому хлорофиллу «а», выделенному из культур водорослей методом бумажной хроматографии. Концентрацию хлорофилла для калибровки рассчитывали спектрофотометрически, используя удельный коэффициент экстинкции, равный 89.3 л/г·см. Проверку прибора производили по флуоресцентному контрольному стеклу.

Для измерений концентраций пигментов пробы фитопланктона фильтровали на мембранные фильтры «Sartorius» с диаметром пор 0.3 мкм объемом 200—300 мл и стекловолоконные фильтры GF-F объемом 500 мл. Фильтры хранили менее двух недель в морозильной камере холодильника. Экстракцию производили 90 % раствором ацетона в течение 18 ч при температуре 6—8 °С.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПОДСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Методика подспутниковых экспериментов вытекает из требований получения опорно-калибровочных данных на регулярной основе. На начальном этапе развития спутниковых методов проблема получения опорных контрольно-калибровочных данных по всему Мировому океану решалась путем анализа и обобщения имеющихся архивных материалов многочисленных судовых экспедиционных наблюдений. Для сравнения использовались хорошо известные карты глобального распределения таких параметров, как, например, глубины видимости белого диска, индекса цвета и первичной продукции. Это было связано главным образом с невысокими метрологическими характеристиками и низким пространственным разрешением спутниковой аппаратуры, а также с отсутствием детальной информации о процессах переноса излучения в системе океан-атмосфера. В дополнение к этому эпизодически проводились специализированные крупномасштабные подспутниковые эксперименты с привлечением научно-исследовательских судов, океанографических платформ и самолетов-лабораторий. Эти исследования позволили в целом выявить возможности спутниковых методов изучения глобальных биооптических явлений в морях и океанах, а также сформулировать требования к спутниковой аппаратуре и к оптическим приборам подспутникового обеспечения. В связи с разработкой долгосрочной программы глобальных наблюдений за цветом морей и океанов необходимо принять методику получения качественных опорно-калибровочных данных подспутниковых наблюдений на регулярной основе с разумной достаточностью и при невысокой стоимости полевых работ.

Разработанная в МГИ НАН Украины методика ориентирована на использование в качестве носителей аппаратуры океанографической платформы МГИ и малотоннажных плавсредств общего назначения. На платформе размещается научное оборудование для стационарных круглосуточных наблюдений в автоматическом режиме большого количества основных и дополнительных океанографических параметров. Близкое расположение платформы от береговой черты не позволяет использовать ее в полной мере для некоторых подспутниковых экспериментов, особенно для калибровки спутников с невысоким пространственным разрешением. Для устранения этого недостатка наблюдения с платформы периодически дополняются измерениями с борта маломерного судна вдоль меридионального разреза с удалением до 10 км от берега.

Для отработки вопросов, связанных с внедрением предложенной методики проведения подспутниковых наблюдений, в 2001 г. была организована специализированная экспедиция МГИ НАНУ, в которой исследования проводились в районе расположения океанографической платформы (пос. Кацивели). Выбор этой точки определялся не только удачным расположением платформы для такого рода исследований, но и наличием в районе платформы соответствующей инфраструктуры (транспортные магистрали, узлы связи, причалы, береговые посты и др.), которая позволяет существенно снизить стоимость полевых измерений.

Основной целью экспедиционных работ являлась отработка методов выполнения натурных измерений на уровне морской поверхности для калибровки спутниковой аппаратуры видимого и микроволнового диапазонов. Задачи исследований включали отработку средств и методов для получения данных об оптико-биологических характеристиках морской воды, динамике морской поверхности и приводного слоя атмосферы, а также регистрации данных о средних и пульсационных характеристиках морской воды и атмосферы в районе океанографической платформы.

Работы на платформе включали измерения: возвышений поверхностных волн струнным волнографом, характеристик обрушений гребней волн, пространственно-временных характеристик поля поверхностных волн, проведение съемки морской поверхности в видимом диапазоне спектра с помощью видео- и фотокамер, измерения индикатрис рассеяния света в морской воде и выполнение стандартных гидрометеонаблюдений.

С борта катера измерялись следующие параметры: спектральный коэффициент яркости моря в диапазоне 320—730 нм; подводная облученность сверху на горизонтах от поверхности до глубины

30 м; глубина видимости стандартного белого диска; цветность моря по шкале Фореля—Уля; температура воды на поверхности моря; температура воздуха на высоте 2 м над уровнем моря; скорость ветра на высоте 3 м и вертикальный профиль температуры воды до глубины 45 м. Одновременно с измерениями океанографических параметров проводился отбор проб для определения концентраций хлорофилла и феопигментов, а также для измерений индикатрис рассеяния света.

Накопленный в экспедиции опыт работ и полученные результаты позволяют приступить к построению системы для получения опорных контрольно-калибровочных данных о биооптических свойствах морских вод на Черном море. Это даст возможность включиться в работу различных международных организаций в качестве иностранных представителей одного из региональных опорных пунктов программы SeaWiFS и, таким образом, наряду с другими известными океанологическими центрами, участвовать в работах по разработке спутниковых методов слежения за состоянием морской экосистемы. Участие МГИ НАН Украины в различных международных программах по проблемам исследования цвета океана из космоса предоставит ему доступ к спутниковой информации любого уровня, а также даст возможность получения материальной и финансовой поддержки в виде разовых поставок научного оборудования или частичной оплаты расходов на проведение региональных подспутниковых экспериментов.

1. Ли М. Е. Логарифмический фотометр-прозрачномер для видимой и ультрафиолетовой областей спектра // Методика и аппаратура для гидрофизических исследований. — Киев: Наук. думка, 1969.—Т. 41.—С. 180—188.
2. Ли М. Е., Крашенинников Б. Н. Автоколлимационный спектральный прозрачномер // Тез. докл. Междунар. конф. «Проблемы Черного моря». — Севастополь: Изд-во МГИ, 1992.—10 с.
3. Ли М. Е., Мартынов О. В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых вод и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: Изд-во МГИ, 2000.—С. 163—173.
4. Ли М. Е., Мартынов О. В. Гидрооптическая аппаратура для подспутниковых исследований // Междунар. научно-технический семинар «Морское и экологическое приборостроение». — Севастополь: Изд-во МГИ, 1995.—С. 29—32.
5. Юнев О. А., Берсенева Г. П. Флуорометрический метод определения концентрации хлорофилла «а» и феофитина «а» в фитопланктоне // Гидробиол. журн.—1986.—**22**.—С. 89—95.
6. Haltrin V. I., Lee M. E., Martynov O. V. Rapid hydrologic measurements of underwater angular distribution of light // Proc. of the Twelfth international conference and workshops on applied geologic remote sensing. — Denver (USA): Publ. by ERIM, 1997.—Vol. 1.—P. 361—368.
7. Haltrin V. I., Lee M. E., Martynov O. V. Polar nephelometer for sea truth measurements // Proc. Second Internat. airborne remote sensing conf. and exibition. — San Francisco (California, USA): Publ. by ERIM, 1996.—Vol. II.—P. 444—450.
8. Hooker S. B., Esaias W. E., Feldman G. C., et al. An overview of SeaWiFS and ocean color // SeaWiFS technical report series.—1992.—**1**.—25 p.
9. Muller J. L., Roswell W. A. Ocean optics protocols for SeaWiFS validation // SeaWiFS technical report ser.—1992.—**5**.—4 p.
10. Tolkachenko G. A., Martynov O. V., Shybanov E. B. Retrieval of absorption spectra of phytoplankton cultures by reflectance measurements // Proc. Internat. conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2001)». — St. Peterburg (Russsia): Publ. by D. S. Rozhdestvensky Optical Society, 2001.—P. 236—242.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 239—246

Комплексирование многозональных космических снимков различного пространственного разрешения для повышения эффективности исследования лесных массивов (на примере Зоны отчуждения ЧАЭС и районов Сибири)

В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, А. Я. Ходоровский, А. Т. Азимов, З. М. Шпортюк, О. Н. Сибирцева, И. Я. Буянова

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

ВВЕДЕНИЕ

Леса играют важную роль в процессе стабилизации экологического состояния регионов, локализации токсикантов, сохранении водного баланса и т. д. Поэтому мониторинг состояния лесов необходим для контроля за устойчивым развитием территорий.

Как известно, наиболее экономичный метод исследования лесов основан на использовании материалов многозональной космической съемки, что позволяет проводить контроль состояния лесов в режиме мониторинга на локальном и региональном уровнях. В особенности эффективно применение космических снимков в районах стихийных бедствий, экологических катастроф, которые охватывают значительные площади, где присутствие людей должно быть ограничено. Это полностью относится к зоне влияния аварии на ЧАЭС.

Использование многозональных снимков для изучения растительности основывается на анализе изменений параметров отраженного солнечного излучения в разных диапазонах спектра электромагнитных волн в результате его взаимодействия с растениями. Спектры отражения в разных диапазонах длин волн дают принципиально разную информацию о растительности, и поэтому все они используются для классификации растительных сообществ и оценки их состояния.

При исследовании растительности по оптическим параметрам проводят как непосредственное сопоставление абсолютных значений отражения в разных спектральных каналах, так и анализ вегетационных индексов. Обе группы показателей имеют свои преимущества и недостатки, и их необходимо использовать совместно.

В основу изучения растительности дистанционными методами положен принцип распознавания образов, для чего необходимы сведения о характере и спектральных свойствах растительности в пределах тестовых участков на изучаемой территории. Сведения о характере растительности можно получить только в результате наземных исследований. По разным данным точность распознавания растительности по дистанционным данным составляет 70—80 %.

Повысить эффективность использования многозональной космической съемки позволяет применение различных методов обработки снимков, комплексирование разновременных снимков различного разрешения для решения поставленных задач и комплексное решение нескольких задач на основе имеющегося набора данных космической съемки.

На Украине с помощью многозональной космической съемки исследовались леса Чернобыльской зоны отчуждения. Леса Зоны преимущественно посажены после 1945 г., среди них преобладают сосновые. Принимая во внимание сравнительно не-

© В. И. ЛЯЛЬКО, А. И. САХАЦКИЙ, А. Я. ХОДОРОВСКИЙ, А. Т. АЗИМОВ, З. М. ШПОРТЮК, О. Н. СИБИРЦЕВА, И. Я. БУЯНОВА, 2002

большой размер территории исследования и наличие на всю площадь лесотаксационных карт, исследования проводились в детальном масштабе с использованием многозональных снимков с высоким пространственным разрешением со спутников «Spot»-4 (20 м), «Landsat TM» (30 м) и «Океан-О МСУ-В» (50 м), полученные за период 1980—2000 гг. Результаты исследований подтверждены наземной заверкой.

Исследования лесов центральной части Сибири (преимущественно Красноярский край) были выполнены с целью оценки пространственного распространения различных растительных сообществ и определения ряда биосферных параметров. В отличие от лесов Украины это естественные леса, возраст которых колеблется в широких пределах, и занимают они несопоставимо большие площади. Поэтому для мониторинга пространственного распределения растительных сообществ нами использовались снимки «Spot» VGT продукт S10 (разрешение 1 км) за период апрель—сентябрь 1999 г., которые охватывают всю территорию исследований в комплексе с многозональными снимками «Landsat-7» за 1999 и 2000 гг. для отдельных регионов, обеспеченных лесотаксационными картами. Снимки и наземные данные для регионов Сибири любезно предоставлены Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA, г. Лаксенбург, Австрия).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧАЭС

Для анализа многозональных космических снимков используются разные методы, но все они не универсальны и требуют адаптации к условиям конкретного района и решаемых задач.

После аварии на ЧАЭС структура землепользования Зоны отчуждения сильно изменилась. Происходит залесение бывших сельхозугодий, леса Зоны испытали радиационное повреждение, ослаблены пожарами, ветровалами, буреломами, развитием очагов вредителей и болезней, отмечаются изменения в составе древостоев и т. п.

В последние 3—4 года наблюдались вспышки развития различных первичных вредителей сосны, прежде всего соснового шелкопряда. Для предупреждения поражения лесов вредителями проводится авиахимобработка, но и при этом возможность возникновения повторных вспышек вредителей остается высокой на протяжении 3—5 лет после их первого появления.

Прекращение на значительных площадях ухода за лесом, приведшее к накоплению сухостоя в силу различных причин, значительно повысило риск возникновения пожаров. Как следствие, значительные площади лесных массивов были повреждены пожарами в 1992 году.

На основании вышеупомянутого, главными задачами, которые стоят при изучении растительности Зоны отчуждения, являются [4, 6]:
— уточнение границ растительных группировок;
— определение фитосанитарного состояния лесов;
— определение степени природной пожароопасности территории.

Для контроля за состоянием лесных массивов в Зоне отчуждения нами использовался многозональный космический снимок со спутника «Spot-4» (Франция), сделанный 14 июля 1998 г. в четырех каналах: зеленом с длиной волны 0.50—0.59 мкм, красном — 0.61—0.68 мкм, ближнем инфракрасном (БИК) — 0.79—0.89 мкм и среднем инфракрасном (СИК) — 1.6—1.75 мкм. Пространственное разрешение на местности составляет 20 м в пикселе. Снимок охватывает большую часть Зоны отчуждения 60×60 км. Кроме того, использовался снимок с КА «Океан-О» (сканер МСУ-В) 03.10.99 г., с достаточно высокой разрешающей способностью. Снимок сделан всего в двух спектральных диапазонах из восьми: ближнем инфракрасном (0.78—0.92 мкм, разрешающая способность 50 м) и в среднем инфракрасном (1.47—1.62 мкм, разрешающая способность 100 м). Качество снимка в ближнем инфракрасном диапазоне хорошее, облачность занимает менее 10 % площади. Снимок, сделанный в средней инфракрасной зоне, имел много недостатков и требовал предварительной обработки с целью повышения его качества. Это было сделано с использованием собственных программных продуктов и фильтров, которыми обеспечивает программа «ERDAS Imagine» [3].

С целью оценки возможностей снимков с КА «Океан-О» для изучения растительности была проведена классификация с обучением снимка от 03.10.99 г. Классификация проводилась по методу максимальной вероятности, как наиболее информативного, с использованием программного продукта «ERDAS Imagine». Объекты обучения включали все основные разновидности растительного покрова, которые были выбраны на основании материалов лесоустроительных работ и относительно равномерно распространены по всей изучаемой территории. Всего было использовано около 250 точек наблюдения. Кроме разновидностей растительности были учтены элементы ландшафта, которые занимают довольно значительную площадь — это водная поверхность, населенные пункты, промплощадка ЧАЭС и песчаные дамбы.

В результате установлено, что в пределах исследуемой территории уверенно выделяются все основ-

ные элементы ландшафта. Это сосновые леса, сосновые леса поврежденные сосновым шелкопрядом, лиственные леса с преобладанием ольхи или березы. Другие виды лиственных лесов выделить не удалось. Уверенно отделяются вырубки и дороги, хорошо видны участки бывших сельхозугодий, которые зарастают сосной и лиственными породами деревьев. Пойма отличается от залежных земель в первую очередь вследствие интенсивного зарастания ольхой и другими породами лиственных деревьев. Относительно хорошо отделяются места пожарищ в лесах. По нашим данным в пределах гарей наблюдается интенсивное зарастание молодой сосной и лиственными деревьями, которые затрудняют их выделение. Практически не выделились те виды растительности, которые занимают небольшие площади. Это касается древостоев с преобладанием дуба и осины, посадки акации, сады и т. п. Среди элементов ландшафта, которые не связаны с растительностью, наиболее четко выделяются естественные и техногенные объекты, которые сложены песками. Открытая водная поверхность обычно выделяется достаточно хорошо. Достоверность приведенной классификации, по данным наземной заверки, удовлетворительная.

Сопоставление результатов классификации ландшафтов по данным снимка с КА «Океан-О» с результатами аналогичной классификации ландшафтов по снимку с КА «Spot-4», показало, что на обоих снимках четко выделяются все основные виды растительности, естественные и техногенные элементы ландшафта, пространственное распространение которых идентично.

Однако значительно меньшая разрешающая способность снимка «Океан-О», неоптимальное время проведения съемки, низкое качество снимка и меньшее количество спектральных каналов послужило причиной выделения на нем меньшего количества классов ландшафтов (рис. 1), по сравнению со снимком с КА «Spot», где выделено более 25 классов.

На рис. 1 приведена классификация растительности Зоны отчуждения, составленная по результатам обработки двух снимков, но границу между ними установить тяжело, что свидетельствует о близости полученных результатов. Безусловно, если бы снимок с КА «Океан-О» был сделан в оптимальные сроки, во всех восьми спектральных диапазонах и был хорошего качества, то результаты классификации были бы значительно лучшими.

С целью усовершенствования приемов классификации растительности и повышения эффективности использования многозональных космических снимков были оценены возможности применения анализа состояния растительных сообществ по значениям позиции «красного края» сигналов отражения. Известно, что позиция «красного края» (в дальнейшем REP) может служить показателем здоровья растительных сообществ, поскольку при повреждении растений этот показатель сдвигается в сторону коротких длин волн («голубой сдвиг»). По определению, позиция «красного края» — это длина волны, на которой скорость изменения спектра отражения на отрезке 670—760 нм максимальная. Особенностью предложенной методики есть то, что определение REP проводится по данным многозонального космического снимка, а не по данным спектрометрии, как делают остальные исследователи.

Верификация изложенной методики была осуществлена на участках с разнообразным растительным покровом при обработке данных космоснимка «Spot-4». Были отобраны участки соснового леса со здоровыми и поврежденными деревьями, для которых были построены кривые относительной спектральной яркости и их первых производных и определена REP. Как свидетельствуют результаты вычислений, для пикселей участка со здоровыми сосновыми деревьями REP = 719 нм, а для пикселей участка с поврежденными деревьями REP = 710 нм. Наличие «голубого сдвига» в спектральных кривых поврежденных деревьев величиной 9 нм совпадает с результатами, которые были получены с использованием спектрометра [1, 2]. Предложенная нами методика определения позиции «красного края» по данным космосъемки является новой. Поэтому нужно провести дальнейшие исследования относительно возможности ее усовершенствования и оптимизации вычислительного алгоритма.

Специальные методы обработки многозонального снимка «Spot-4» позволили также построить схему фитосанитарного состояния сосновых лесов Зоны отчуждения и схему природной пожароопасности района работ, которые были использованы ГП «Чернобыльлес» для проведения лесокультурных мероприятий в 1999 г. [4].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ СНИМКОВ РАЗНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ С КА «LANDSAT-7» И «SPOT» VGT ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СИБИРИ

Исследуемая территория находится на юге Красноярского края и покрыта преимущественно хвойными лесами разного состава [5]. Леса играют важную роль в экологии всего региона и интенсивно эксплуатируются, особенно вблизи железных дорог и рек, по которым можно сплавлять древесину. Большие размеры территории, недостаточное освоение, труднодоступность многих районов, суровые климатические условия значительно усложняют ее

изучение наземными методами. В этих условиях решающее значение для оценки экологии региона, определения состава лесов, их возраста, запасов древесины, фитосанитарного состояния и пожароопасности приобретает использование материалов многозональной космической съемки высокого и низкого пространственного разрешения. С помощью этих материалов можно также осуществлять контроль за вырубкой лесов и их восстановлением, оценить транспортную инфраструктуру любого региона. Сравнительный анализ разновременных космических снимков разрешает проводить мониторинг изменений этой территории. Все исследования базируются на обязательном использовании наземных данных по отдельным тест-участкам.

На первом этапе выполнения работ основной задачей была отработка методических подходов к обработке имеющихся материалов космической съемки для проведения классификации лесных растительных сообществ регионов Сибири. работы велись на площадях, на которые имелись лесотаксационные карты, что позволяло оценить возможности космической съемки для решения поставленных задач. По этой территории в нашем распоряжении были такие космические снимки:

1. «Spot» VGT — 18 снимков (продукт S10), за период 01.04.99—30.09.99. Снимки покрывают площадь 2500×1600 км и охватывают всю территорию исследований. Снимки имеют разрешающую способность 1×1 км и представляют собой изображения, которые интегрируют спектральные яркости земных покровов в четырех спектральных каналах за десятидневный период. Съемка «Spot» VGT проводится в следующих четырех каналах: 1 — 430—470 нм (Blue); 2 — 610—680 нм (Red); 3 — 780—890 нм (NIR) ; 4 — 1580—1750 нм (SWIR).

2. «Landsat-7» — семь снимков в семи стандартных спектральных диапазонах. Снимки сделаны летом 1999 и 2000 года, на них расположены все тестовые участки.

Для дешифрирования по космоснимкам состава растительности лесных массивов использовалась созданная ранее база данных, включающая описание лесотехнических характеристик выделов в границах нескольких десятков лесничеств, которые относительно равномерно расположены по всей территории исследования. База данных была создана в формате ArcInfo.

Векторные изображения кварталов и выделов были совмещены с космоснимками с помощью программы «ERDAS Imagine» и таким образом была обеспечена возможность сопоставления данных космической съемки с лесотехническим описанием отдельных участков.

Используя установленные сигнатуры основных классов растительности, была проведена классификация с обучением космоснимков «Landsat-7» с помощью программного продукта «ERDAS Imagine». Классификация была выполнена методом максимальной вероятности, так как было доказано нами раньше, что этот метод позволяет получить более точную классификацию по сравнению с методом минимального расстояния и расстояния Махалонобиса [4]. По данным других исследователей при классификации лесной растительности метод наибольшей вероятности также показал удовлетворительные результаты.

Метод максимальной вероятности базируется на определении вероятности отнесения каждого пикселя к определенному классу. Мы допускаем, что эти вероятности одинаковы для всех классов и имеют нормальный закон распределения данных.

Суть работы заключалась в следующем. Программой опрашивались пиксели изображения в пределах значительного количества тестовых участков. По результатам замеров строились гистограммы распределения спектральных яркостей, вычислялись средние значения и статистические параметры распределения для различных видов растительных сообществ в каждом из каналов многозональных космических снимков «Landsat-7». Затем на основе анализа отдельных тестовых участков с помощью программы «ERDAS Imagine» были созданы суммарные сигнатуры, которые объединяли данные по отдельным растительным ассоциациям, таким образом были получены спектральные характеристики для всех групп древостоев, выделяемых на лесотаксационных картах, и для разных элементов ландшафта (водная поверхность, пески и т. д.). Всего первоначально было выделено 72 класса растительности и элементов ландшафта и определены их спектральные характеристики. Затем была проведена сравнительная оценка сигнатур всех выделенных классов объектов с целью прогноза надежности классификации растительности района по методу наибольшей вероятности. Создана матрица такой оценки. В результате часть классов, выделявшихся с низкой надежностью, была объединена, и в итоге из 72 классов осталось 40. По результатам проведенного анализа наиболее уверенно различаются сосновые, темнохвойные и лиственные леса, четко идентифицируется растительность лугов, вырубки разного возраста, водная поверхность, песчаные образования в пойме р. Енисей и другие. Хуже различаются между собой осиновые и березовые леса, площади, занятые молодой березой. Смешанные березово-осиновые леса часто относятся к классу берез или осины. Плохо различаются между собой дороги и свежие вырубки возрастом менее пяти лет. Поэтому эти классы были объединены, но в целом вырубки разного возраста выделяются достаточно хорошо, что по-

Рис. 1. Схема классификации растительности восточной части Зоны отчуждения ЧАЭС по типам растительных сообществ, выполненная с использованием многозональных космических снимков с КА «Spot-4» (14.07.98 г.) и «Океан-О» (03.10.99 г.): 1 — леса с преобладанием сосны; 2 — сосновые леса, поврежденные сосновым шелкопрядом; 3 — разреженные смешанные леса и площади, которые зарастают вербой; 4 — смешанные лиственные леса с преобладанием березы; 5 — залесение территорий преимущественно молодой березой; 6 — смешанные лиственные леса с преобладанием ольхи; 7 — акация; 8 — луга и пойменные участки; 9 — залежные земли; 10 — гари; 11 — открытый песчаный грунт с редкой травянистой и кустарниковой растительностью; 12 — вода; 13 — техногенные объекты; 14 — облака; 15 — тени от облаков. Классификация проведена с использованием программного продукта «ERDAS Imagine» по методу максимальной вероятности

Рис. 2. Сравнение фрагмента классифицированного изображения снимка «Landsat-7» 22 июня 2000 р. (А) после пороговой обработки пикселей с результатами фитосанитарной карты, построенной с помощью авиационной съемки (Б). Черним цветом показано: на рис. А — пикселы, которые превысили пороговые значения при классификации, на рис. Б — участки леса, поврежденные сибирским шелкопрядом (Dendrolimus Sibiricus) по данным авиационной съемки [7]

Рис. 3. Классифицированное изображение снимка «Spot» VGT центральной Сибири (продукт S10 за первую декаду июня 1999 р.)

зволяет использовать космические снимки для контроля за возобновлением растительности.

В результате проведенной классификации получено распределение растительных сообществ в пределах четырех полных сцен «Landsat-7».

Анализ результатов классификации прежде всего подтвердил высокую точность выделения основных разновидностей хвойных и лиственных лесов в пределах исследуемой территории. Контрольное сопоставление классифицированного изображения с описанием выделов почти полностью подтверждает предшествующий анализ сигнатур в отношении надежности установления классов лесов. Процент правильно расклассифицированных пикселов приблизительно совпадает с оценкой сигнатур. Только еловые и кедровые леса, согласно лесотехническому описанию в некоторых случаях были ошибочно отнесены к сосновым лесам. Возможно, дальнейший анализ позволит найти пути повышения точности классификации.

Дополнительно к проведенной классификации был выполнен анализ классифицированного изображения в отношении порогового расстояния пикселов, которые хотя и отнесены к определенному классу по методу наибольшей вероятности, но их спектральные яркости сильно отличаются от среднестатистических для данного класса. При анализе хвойных лесов установлено, что пикселы, которые превышают стандартные пороговые значения, обычно отвечают хвойным лесам, пораженным вредителями, главным образом сибирским шелкопрядом (Dendrolimus Sibiricus) (см. рис. 2).

Значительную сложность представляет проблема оценки точности проведенной классификации. Сопоставление данных по отдельным выделам лесотаксационных карт с результатами проведенной классификации показало, что данные дешифрирования дают значительно более детальную картину распределения растительности. Это и неудивительно: по материалам дешифрирования идет попиксельная оценка (30×30 м), тогда как по наземным данным такой единицей есть выдел, размеры которого порядка 1 га и более. Поэтому была предложена 12-бальная шкала точности оценки результатов классификации. Контрольные сопоставления с наземными данными указывают на точность классификации снимков «Landsat-7» на уровне 8—10 баллов, что соответствует хорошей точности классификации (в среднем 75—85 %). В ряде случаев расхождения наземных и дистанционных данных обусловлено значительно большей детальностью наблюдений на снимках, а также, вероятно, теми изменениями, которые произошли за время между проведением лесотаксационных работ и космической съемкой.

Данные классификации растительности по снимкам с «Landsat-7» были использованы для работы со снимками «Spot» VGT, которые имеют гораздо меньшее разрешение на местности, но охватывают значительно большие площади, проводятся с высокой периодичностью (ежедневно) и намного дешевле. Более того, использование снимков «Spot» VGT позволяет вести работы в режиме мониторинга, а это значительно повышает информативность исследования и расширяет круг решаемых задач. Однако при использовании этих снимков приходится сталкиваться с целым рядом трудностей. Прежде всего, это проблема выборов тест-участков. Площади выделов на лесотаксационных картах измеряются первыми гектарами, тогда как каждый пиксель «Spot» VGT охватывает площадь в 100 га. Поэтому для обучения выбирались наиболее однородные участки растительности. Это достигается и за счет обобщения отдельных классов растительности. Всего нами анализировалось около 20 классов растительности, но в результате были выделены 11 классов растительности — светлохвойные леса, темнохвойные леса с преобладанием пихты, ели или кедра, смешанные леса, лиственные леса с преобладанием березы или осины. Кроме того, выделились вырубки, зарастающие березой, свежие вырубки, заросшие травой, луга и пастбища, гари и элементы ландшафта. Результаты классификации растительности приведены на рис. 3.

По нашему мнению, полученные данные есть лишь первым шагом на пути проведения более детальной классификации с выделением разновидностей хвойных и лиственных пород деревьев разного возраста, их фитосанитарного состояния и пожароопасности.

В настоящее время изучаются возможности использования временных серий снимков «Spot» VGT для проведения классификации данной территории. Проведенные исследования изменений спектральных яркостей и вегетационных индексов на протяжении вегетационного цикла по данным снимков «Spot» VGT в пределах полигона Большое позволяют говорить о возможности использовать отличия в изменении, в частности, индекса NDVI у различных растительных сообществ, для выполнения классификации изображений с целью определения пространственного расположения основных растительных группировок в пределах рассматриваемой территории.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований были решены разнообразные вопросы методики классификации растительности Зоны отчуждения по типам растительных сообществ. Установлено, что для про-

ведения классификации растительности с помощью программного продукта «ERDAS Imagine» наиболее пригодной является классификация с обучением, которая выполняется по методу наибольшей вероятности. Она лучше всего отвечает данным контрольных точек наблюдений.

Предложена методика определения позиции «красного края» по данным многозонального космического снимка. Верификация этой методики показала, что в границах сосновых лесов значения REP могут служить индикаторами фитосанитарного состояния древостоев.

Новые методические разработки были использованы для построения схемы фитосанитарного состояния лесов Зоны и оценки природной пожароопасности растительности в ее границах.

Проведена классификация лесов Сибири по снимкам с «Landsat-7» и «Spot» VGT. Классификация по снимкам «Landsat-7» показала достаточно высокую точность выделения основных лесных растительных сообществ и позволила осуществить классификацию значительно большей территории по снимкам «Spot» VGT, использование которых позволяет вести работы в режиме мониторинга, а это значительно повышает информативность исследования и расширяет круг решаемых задач.

Методические приемы, использованные при обработке снимков «Spot» VGT при изучении лесов Сибири, могут быть применены и для изучения лесов Украины как по аналогичным снимкам, так и по снимкам с AVHRR NOAA. Последние обладают дополнительно тепловыми каналами, имеют более высокую периодичность съемки (несколько раз в сутки), аналогичное пространственное разрешение (1.1 км) и распространяются бесплатно.

Исследования изменений спектральных яркостей и вегетационных индексов на протяжении вегетационного цикла по данным снимков «Spot» VGT позволяют говорить о возможности использования снимков «Spot» VGT с целью определения пространственного расположения основных растительных сообществ лесов Сибири.

1. Buschmann C. Fernerkundung von Pflanzen // Naturwissenschaften.—1993.—80.—P. 439—453.
2. Buschmann C., Nagel E. Reflexionsspektren von Blettern und Nadeln als basis fer die physiologische Beurteilung von Baumscheden. — Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1992.—165 p.—PEF-Report Nr.90.
3. ERDAS Field Guide (1999) Fifth Edition, Revised and Expanded. ERDAS c Inc., Atlanta, Georgia.
4. Лялько В. І., Азімов О. Т., Сахацький О. І., Ходоровський А. Я. Оцінка тенденцій зміни екологічного стану зони впливу аварії на ЧАЕС за різночасовими багатозональними космічними знімками // Тез. доп. науково-практичної конф. «Наука. Чорнобиль-97». Київ, 11—12 лютого 1998.—С. 27—28.
5. Леса СССР. — М.: Наука, 1969.—Т. 4.—С. 350—387.
6. Сахацкий А. И., Лялько В.І, Азімов О. Т. та ін. Використання багатозональних космічних знімків з метою вивчення рослинності Зони Відчуження ЧАЕС // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві: Матер. науково-технічного семінару 27—28 травня 1999 р., Київ.—С. 105—113.
7. Харук В. И., Кожуховская А. Г., Пестунов И. А. и др. Съемка NOAA/AVHRR в мониторинге вспышек сибирского шелкопряда // Исслед. Земли из Космоса.—2001.—№ 1.—С. 80—86.

Космічний моніторинг лісових пожеж за знімками NOAA

В. В. Дубровський, Я. В. Пархісенко, О. Ю. Петроченко, Л. С. Потапенко, О. Д. Рябоконенко, Ю. Н. Штепа

Український центр менеджменту землі і ресурсів, Київ

Лісові пожежі руйнують ліси, фауну та грунти, забруднюють атмосферу і воду. В Україні лісові пожежі в деяких регіонах можуть привести і до поширення радіоактивного забруднення. Так, через забрудненість Полісся радіонуклідами пожежі на цих територіях можуть супроводжуватися підняттям радіоактивних речовин у повітря із подальшим перенесенням на значні території. Місця і час фіксації лісових пожеж, як показує практика, не відповідають чітким закономірностям, а ступінь пожежонебезпечності лісів різко варіює по території країни і сезонах року. Тому своєчасне виявлення лісових пожеж та прийняття необхідних заходів з їхньої оперативної ліквідації є актуальною природоохоронною задачею. У зв'язку з цим необхідність залучення всіх доступних засобів оперативного виявлення пожеж на початковій стадії розвитку не викликає сумнівів. Традиційне викори-

© В. В. ДУБРОВСЬКИЙ, Я. В. ПАРХІСЕНКО, О. Ю. ПЕТРОЧЕНКО, Л. С. ПОТАПЕНКО, О. Д. РЯБОКОНЕНКО, Ю. Н. ШТЕПА, 2002

стання авіації для патрулювання пожежонебезпечних районів потребує значних коштів, що обумовлює зростання інтересу до використання супутникових систем зондування земної поверхні для виявлення та моніторингу лісових пожеж. Сьогодні для проведення космічного моніторингу лісових пожеж, як правило, використовується інформація п'ятиканального радіометра AVHRR (супутники серії NOAA).

Спектральні діапазони каналів $\lambda\lambda$ = 0.58—0.68, 0.725—1.1, 3.55—3.95, 10.3—11.3, 11.5—12.5 мкм. Метод визначення пожеж базується на інформації каналу 3 AVHRR, бо на дану область припадає максимум випромінювання об'єктів при температурі горіння 800—1000 К. Необхідно зазначити, що космічна зйомка апаратами NOAA дозволяє відслідковувати пожежі в основному у регіональному масштабі через невисоку роздільну здатність (1.1 км).

Тестовий моніторинг пожеж на території України провадиться в Українському центрі менеджменту землі і ресурсів (УЦМЗР). УЦМЗР отримує до трьох знімків NOAA на добу з різних супутників цієї серії, що дозволяє здійснювати регулярний моніторинг. Кожний знімок охоплює територію України.

Методи визначення пожеж базуються на використанні оцінки випромінювання за каналами 3, 4, 5 AVHRR [1—3], які відповідають інфрачервоному діапазону спектру. Пожежі визначаються як екстремальні значення випромінювання по 3 каналу AVHRR. Шлейфи диму, викликані пожежами, добре визначаються на каналах 1 та 2 AVHRR (відповідно видимий і близький інфрачервоний діапазони).

Для більш точної ідентифікації пожеж використовуються порогові алгоритми, за якими визначається температура випромінювання по 3-му і 4-му каналах. Прилад AVHRR відкалібровано за температурою до 330 К. Шлейфи диму добре визначаються за 1-м і 2-м каналами і також успішно використовуються для ідентифікації пожеж.

При аналізі пожежонебезпечних ділянок зображення розбиваються на три типи.

Нічні. Їхньою особливістю є низька вірогідність «помилкових пожеж», що могли б викликатися відбитим сонячним випромінюванням та нагрітими ділянками земної поверхні, якби знімок був денний, вранішній або вечірній. Однак, на жаль, нічні знімки NOAA УЦМЗР фактично не отримує.

Рис. 1. Пожежі торф'яників 24.10.2000 р.

Рис. 2. Пожежа на Кінбурзькій косі 22 липня 2001 р. Чорним виділено територію, що горить, білим — дим від пожежі

Ранкові/вечірні знімки. Це ті знімки, що регулярно отримує УЦМЗР. На зображення цього класу сонячне випромінювання здійснює певний, але незначний вплив. «Пожежні» піксели мають відповідати критерію: $T3 > 298$ K, $T3 - T4 > 6$ K, $T4 > 265$ K, $R2 < 35$ % (R2 — альбедо в 2-му каналі, $T3 - T5$ — радіояскравісні температури в 3—5-му каналах).

Денні зображення. Для них характерна велика вірогідність «помилкових пожеж» за рахунок нагрітих ділянок, сонячних блисків. Тому за денними зображеннями складно визначати пожежі. Піксел відмічається як «потенційна пожежа» при умовах $T3 > 308$ K, $T3 - T4 > 8$ K, $T3 - T4 - 3(T4 - T5) > 4$ K (маскування відкритих нагрітих ділянок) и $R1 - R2 > 1$ % (маскування відбиття від води) [1—3].

Для визначення місцезнаходження пожеж вихідні знімки геокодуються і формуються карти з растрового зображення та векторних шарів географічних об'єктів (адміністративні границі, населені пункти, дороги). Для цих цілей використовуються програмні пакети «ERDAS Imagine» та «ArcView».

За допомогою знімку із супутника NOAA вранці 12 травня 2000 р. було отримано знімок, на якому зафіксовано пожежі в Білорусі. На знімку видно дим від пожеж в південній частині Білорусі, що розповсюдився на велику відстань і досяг території України. УЦМЗР надав ці матеріали Міністерству України з надзвичайних ситуацій. Дане зображення синтезовано за даними видимого і інфрачервоного каналів AVHRR. Ділянки з пожежами мають екстремально високий рівень інфрачервоного випромінювання в діапазоні 3.55—3.95 мкм (3-й канал AVHRR), що відповідає яскравим точками на зображенні. Це добре демонструють трьохмірні гістограми інфрачервоного випромінювання, що в місцях пожеж гістограми мають чітко виражені екстремуми. Космічне зображення є результатом синтезу інфрачервоного, ближнього інфрачервоного і видимого каналів AVHRR. Завдяки такому синтезу пожежі проявляються як точки яскраво червоного кольору, дим від пожеж і хмари мають блакитний колір, земля — зелений. Часто саме така комбінація найбільш сприйнятлива для реєстрації пожеж. Так, наприклад, на рис. 1 чітко помітні пожежі торф'яників і дим від них, що мало місце у Львівській області 24 жовтня 2000 р.

В результаті моніторингу пожеж УЦМЗР у 2001 році зафіксував велику кількість пожеж, що слід пов'язувати із надзвичайно сухим та жарким літом (липень—серпень), особливо на півдні України. Так, тільки 2 серпня 2001 р. на території України зафіксовано понад 100 пожеж. Це в основному, горіння стерні і соломи, але також були зафіксовано і горіння торфовищ у Київській області, степових ділянок, у тому числі у заповідних зонах. Так, 22 липня 2001 р. УЦМЗР виявив пожежу на Кінбурзькій косі (рис. 2).

Пожежа була зафіксована вранці і до вечора інтенсифікувалась. 9 серпня 2001 р. УЦМЗР зафіксував пожежу поблизу перепускного пункту Зони відчуження ЧАЕС «Дитятки».

В усіх випадках УЦМЗР підтримував робочі контакти з МНС України, надаючи фрагменти знімків разом з відповідними коментарями.

ВИСНОВКИ

Космічний моніторинг пожеж, за відповідних метеорологічних умов, дозволяє визначати зони потенційних пожеж, що сприятиме сталому екологічному менеджменту, допоможе органам виконавчої влади ефективніше вирішувати питання реагування та запобігання пожежам у природних екосистемах.

1. Барталев С. А., Беляев А. И., Ершов Д. В. и др. Разработка ГИС мониторинга лесных пожаров России // ArcView #1. Современные информационные технологии.—1998.—С. 7—8.
2. Колодяжний О. А, Луман Є., Машковський А. Г. та ін. Організація космічного моніторингу пожеж // Матер. першої всеукраїнської конф. з космічних досліджень, 2001.
3. Ceccato P., Flasse S. P., Downey L. D. An automatic algorithm to detect vegetation fires globally from NOAA sub AVHRR data // EARSeL Advances in Remote Sensing.—1996.—**4**, N 4-XI.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 249—254

Возможности прогнозирования урожайности зерновых культур на основе совместного использования многозональных космических снимков AVHRR NOAA и «Landsat TM» (на примере Киевской области)

В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, А. Я. Ходоровский, Г. М. Жолобак, И. Я. Буянова

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз урожайности зерновых культур на региональном уровне — один из важнейших вопросов аграрной науки, от достоверности решения которого зависит эффективность политики государства по сельскому хозяйству, и ему всегда уделялось достаточно внимания. Прогноз осуществлялся разными методами, преимущественно по данным наземных исследований, что требовало значительных затрат сил, средств и времени.

В последние годы в разных странах для регионального прогноза урожайности широко используются материалы съемки сканером AVHRR со спутников серии NOAA, которые наиболее полно отвечают поставленной задаче. Для этого разрабатываются системы оптимального мониторинга вегетации растительности и надежной оценки урожайности [1—3, 6—9]. Например, с 1988 года на территории стран ЕС осуществляется программа по применению дистанционного зондирования для статистического учета в сельском хозяйстве, инициированная Главным Управлением сельского хозяйства совместно с Европейским статистическим управлением (Евростат). Эта программа известна как Проект MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing — мониторинг сельского хозяйства с помощью дистанционного зондирования). Одним из практических приложений этой программы являются методы прогнозирования урожая, которые разработаны на основе компьютерной дешифровки космоснимков с применением программного обеспечения (CGMS — Crop Growth Monitoring System) для контроля состояния посевов и оценки будущего урожая. Эта система была реализована в 1996 году и основана на агрометеорологических моделях, полученных, главным образом, по метеорологическим и агрономическим данным, а также данным о состоянии грунтов и дополнена космическими снимками низкого разрешения со спутника NOAA. С этого времени при поддержке Совместного исследовательского центра (Испра, Италия) ежегодно издается по шесть бюллетеней MARS, в которых дается текущая оценка урожая таких культур, как пшеница (твердая и мягкая), ячмень, кукуруза и рапс на зерно, подсолнечник, сахарная свекла и картофель. Методология использования снимков NOAA постоянно совершенствуется и дополняется с учетом как региональных особенностей конкретной страны, так и прогресса в технологии получения новых космоснимков, обеспечивающих пространственное разрешение, сравнимое с разрешением аэрофотоснимков.

Цель нашей работы — создание подобной системы прогноза урожайности зерновых культур, в частности озимой пшеницы в пределах Украины. Особенностью создаваемой системы будет максимальное использование дистанционных данных и минимально сопутствующей информации, которую трудно получить из открытых источников. Кроме того, она должна позволять работать в природных условиях Украины, когда мало безоблачных дней, из-за чего существующие методы неприменимы.

© В. И. ЛЯЛЬКО, А. И. САХАЦКИЙ, А. Я. ХОДОРОВСКИЙ, Г. М. ЖОЛОБАК, И. Я. БУЯНОВА, 2002

Для получения достоверной информации о возможности прогнозирования зерновых культур, как и любого другого биологического объекта, необходим как минимум трехлетний цикл наблюдений.

В Украине подобные работы с использованием съемок со спутников NOAA (пространственное разрешение 1.1 км) не проводились. Предыдущие исследования основывались на данных снимков высокого (20—30 м) и среднего (250 м) пространственного разрешения, при этом решались совсем другие задачи.

1.ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДА

Теоретической основой использования сканерных съемок AVHRR со спутника NOAA для прогноза урожайности есть известные зависимости природной продуктивности почв (NPP) от абсорбированной фотосинтетически активной радиации (APAR), которая просуммирована за период вегетации и умножена на определенный коэффициент E, учитывающий особенности почв и климата данного района.

Так, согласно [4] продуктивность почвы равна

$$P = \mathrm{E}\int_0^t f_{\mathrm{par}}\mathrm{PAR}\,dt, \qquad (1)$$

где f_{par} — часть фотосинтетически активной радиации (PAR), которая абсорбируется; P — продуктивность почвы в кг/га, 0 и t — начало и конец сезона вегетации. Согласно теоретическому и экспериментальному анализу связи между NDVI и APAR [10], f_{par} может быть заменена на NDVI, и тогда

$$P = \mathrm{E}\int_0^t (a\cdot\mathrm{NDVI} + b)\mathrm{PAR}\,dt, \qquad (2)$$

где a, b — коэффициенты уравнения регрессии.

Учитывая, что E и PAR являются во многом константами для определенного района, показана возможность оценки NPP только по данным NDVI [5]. Согласно [11] коэффициент E определяется климатическими условиями, и в первую очередь водным стрессом. Учитывая эти предпосылки, ряд исследователей используют данные съемки со спутника NOAA для создания эмпирических моделей прогнозирования урожайности, в частности зерновых культур [1, 3, 8—9]. Так была установлена зависимость между урожайностью и суммой накопленных NDVI за период вегетации с коэффициентом корреляции около 0.7 [3, 8—9].

В настоящее время ведутся работы, которые должны повысить надежность корреляции спутниковой информации и урожайности. К примеру, делаются попытки учета метеорологических факторов — осадков R_{G}, температуры воздуха T_{a}, температуры земли T_{s}, солнечной радиации T_{s}^2 и анализируются возможности использования накопленных сумм NDVI (ΣNDVI) за определенные периоды для отдельных видов сельскохозяйственных культур, типов почв и т. д. Для анализа зависимостей используется техника множественной линейной или нелинейной регрессии, а результаты представляются в виде конкретных уравнений.

Например, такое уравнение получено для района Costilla (Испания) [3]. Оно удачно описывает взаимосвязь урожайности зерновых культур со спектральными яркостями по снимкам AVHRR NOAA и агрометеорологическими данными:

$$Yield\ (\text{кг/га}) = \alpha + \beta\cdot\mathrm{NDVI_J} + \gamma T_{\mathrm{S}}^2 + \delta(T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{a}}) + \varepsilon R\sigma, \qquad (3)$$

где

$$\mathrm{NDVI_J} = \frac{\Sigma_{1\ \mathrm{June}-31\ \mathrm{July}}(\mathrm{NDVI} - \mathrm{NDVI_{January}})}{\mathrm{num\ days(1\ June - 31\ July)}}, \qquad (4)$$

$$R\sigma = \frac{\Sigma_{1\ \mathrm{May}-10\ \mathrm{July}} R_{\mathrm{G}}}{\mathrm{num\ days(1\ May - 10\ July)}}, \qquad (5)$$

$$T_{\mathrm{S}}^2 = \frac{\Sigma_{20\ \mathrm{April}-10\ \mathrm{July}} T_{\mathrm{S}}^2}{\mathrm{num\ days(20\ April - 10\ July)}}, \qquad (6)$$

$$T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{a}} = \frac{\Sigma_{20\ \mathrm{April}-10\ \mathrm{July}}(T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{a}})}{\mathrm{num\ days(20\ April - 10\ July)}}; \qquad (7)$$

средние значения α = 8970, β = 3590, γ = −81, δ = = 2215, ε = 63.

Параметры температуры и осадков, которые входят в уравнение, подчеркивают необходимость информации о водном стрессе, поскольку водные ресурсы обычно являются основным лимитирующим фактором в засушливых регионах. Используя подобное уравнение, можно получить карту прогнозируемой урожайности для всей области исследования.

Аналогичный подход, использующий сумму накопленных NDVI для прогноза урожайности проса на примере Сенегала, изложен в работах [6—9], где сделаны попытки максимально упростить модели прогноза, сохраняя при этом достаточно высокую надежность предсказания. Некоторые дополнительные параметры, кроме суммы накопленных NDVI за определенный период времени, такие как процент обрабатываемых земель, могут достаточно надежно определяться по данным дистанционного зондирования. Примером могут служить уравнения прогноза урожайности проса для районов Сенегала, где обрабатываемые земли составляют более 22.5 %:

$$Yield = $$
$$= 774.1\left(\Sigma NDVI_{1Sept.-10Okt.} - \Sigma NDVI_{1May-31May}\right) -$$
$$- 1195 \quad (r^2 = 0.729) \qquad (8)$$

В случае, если процент обрабатываемых земель составляет менее 22.5 %, имеется подобное уравнение, но оно менее надежно:

$$Yield = $$
$$= 3793.7\left(\Sigma NDVI_{1Sept.-10Okt.} - \Sigma NDVI_{1May-31May}\right) -$$
$$- 254 \quad (r^2 = 0.663). \qquad (9)$$

Однако, если при этом знать процент обрабатываемых земель (AGRIPRC), что весьма точно можно установить дистанционными методами, может быть получена более надежная модель:

$$Yield = $$
$$= 3881.1\left(\Sigma NDVI_{1Sept.-10Okt.} - \Sigma NDVI_{1May-31May}\right) +$$
$$+ 25.0AGRIPRC - 531 \quad (r^2 = 0.763). \qquad (10)$$

Неоспоримым преимуществом таких моделей является то, что нет необходимости использовать значительные объемы наземных данных по агрометеорологическим наблюдениям. Во многих случаях такие данные либо трудно собрать, либо их вовсе не существует.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Изложенные ниже результаты исследований являются итогом первого этапа работ, целью которого была оценка возможностей использования спутниковых съемок низкого пространственного разрешения (порядка 1 км) для прогноза урожайности озимой пшеницы на примере Киевской области. Оценка урожайности дается на уровне административных районов.

В работе использованы данные сенсора AVHRR со спутника NOAA. По этим данным вычислялся индекс NDVI для дальнейшего его интегрирования за период вегетации и сопоставления с архивными данными об урожайности. Основное внимание уделялось накоплению исходных данных — спутниковой и наземной информации и их начальной обработке. Для апробирования методических приемов по обработке информации первоначально рассматривались данные об урожайности озимой пшеницы только в 1996 и 1999 гг. Выбор именно этого времени съемки обусловлен тем, что урожайность 1996 г. близка к средней многолетней, а в 1999 г. — была самой низкой за последние 10 лет. Кроме того, были получены снимки за 2001 год, которые предоставлены Украинским центром менеджмента земли и ресурсов, (г. Киев) для апробации методики. Как известно, в 2001 году был получен самый высокий урожай зерновых за последние 10 лет (39.8 млн т).

В целом система оценки урожайности зерновых на базе съемок со спутника NOAA состоит из следующих стадий:

— организация сбора снимков NOAA AVHRR на протяжении всего вегетационного периода;

— подготовка специального программного обеспечения для обработки снимков AVHRR NOAA;

— создание баз данных в ГИС для проведения пространственного анализа;

— подготовка программного обеспечения для построения моделей прогноза урожайности и собственно прогноз урожайности.

В качестве программного обеспечения, позволяющего провести точную геометрическую и радиометрическую коррекцию снимков, а также для вычисления индекса NDVI применялся программный продукт «ERDAS Imagine».

Для проведения работ были сформированы следующие наборы данных:

1. Все снимки NOAA, которые не содержат значительной облачности в пределах исследуемого района за период апрель — сентябрь 1996 и 1999 года.

2. Цифровые топографические карты района исследований масштаба 1:500000, 1:200000 и для некоторых участков 1:25000.

3. Статистические данные по урожайности зерновых по 25 районам Киевской области в 1996 г. и 1999 г.

4. Агрометеорологические данные.

5. Карта почв Киевской области.

Вся информация была переведена в цифровые форматы для использования в ГИС системах MapInfo и ArcView.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке снимков со спутников NOAA выявилась следующая особенность, свойственная Киевской области — количество снимков, где облачность минимальная и позволяет проводить измерения NDVI, было сравнительно незначительным. За весенне-летний вегетационный период (четыре месяца) таких снимков было получено: семь в 1996 г. и восемь в 1999 г. Остальные снимки оказались неприемлемыми из-за значительной облачности. В связи с этим методики, базирующиеся на использовании суммарных подекадных снимков NOAA для данного региона, неприемлемы.

Была проведена геометрическая и радиометрическая коррекция собранных снимков NOAA и разработана процедура опроса спектральных яркостей

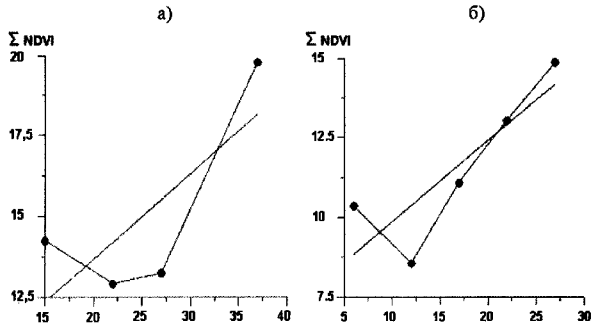


Рис. 1. Зависимость усредненной аккумулированной суммы нормированного разностного вегетационного индекса (SIGMA NDVI) от урожайности: а — для 1996 г. ($\Sigma NDVI = 0.2631125$(Yield) + 8.402 ($r^2 = 0.577$), б — для 1999 г. ($\Sigma NDVI = = 0.253355$(Yield) + 7.314625 ($r^2 = 0.734$)

снимков для опорных точек с известными координатами, что позволило затем провести сопоставление наземных и спутниковых данных.

Обработка имеющихся данных дала возможность установить зависимость между усредненным суммарным значением NDVI (ΣNDVI) за основной период вегетации, продолжительностью около 70 дней (последняя декада апреля — первая декада июля) и усредненной урожайностью (Yield). Эти взаимосвязи для 1996 г. и 1999 г. применительно к районам Киевской области аппроксимируются линейной зависимостью (рис. 1). Анализ зависимостей указывает на необходимость дифференцированного подхода к районам, которые имеют среднюю урожайность более 20 ц/га, отделяя их от тех, которые имеют урожайность 10—20 ц/га. Районы с урожайностью менее 10 ц/га, как правило, плохо вписываются в данные закономерности. Видимо, это связано с тем, что в пределах районов развиты супесчаные и суглинистые почвы, обедненные гумусом и обладающие существенно другими отражательными характеристиками. Следовательно, поиск закономерностей изменчивости урожайности необходимо проводить для территорий с однородными природными условиями, что согласуется с выводами и других исследователей.

Учитывая недостатки обработки снимков AVHRR NOAA предварительного этапа, на котором не определялись конкретные участки формирования посевов зерновых культур, нами начаты работы, которые ставят своей целью более качественную обработку снимков, а именно такая обработка должна, во-первых, определять по данным NOAA пикселы снимков, которые охватывают площади посевов зерновых культур (в первую очередь озимой пшеницы), во-вторых, провести на основе данных именно этих пикселей прогнозирование урожайности зерновых культур. Таким образом, решаются задачи распределения площадей посевов зерновых культур и прогнозирования урожайности на различных фазах вегетации.

В качестве опорного полигона для отработки методики решения этих задач нами использовалась южная часть Киевской области, и в частности, Мироновский район, где собраны многочисленные данные полевых наблюдений. На данную территорию, кроме серии снимков AVHRR NOAA, также были заказаны снимки высокого пространственного разрешения (30 м/пкл) «Landsat TM» (18.05.2001 г.) и «Landsat TM» (19.06.2001 г.).

Используя программный продукт «ERDAS Imagine 8.4» и наземные наблюдения тестовых участков, была проведена классификация снимков «Landsat TM» по методу максимальной вероятности. В результате классификации были установлены площади посевов зерновых культур, в первую очередь, озимой пшеницы, ржи и ячменя.

Как показала наземная заверка на тестовых участках в Мироновском районе, где проводились полигонные исследования, эти классы растительности выделяются с достаточно высокой надежностью (более 90 %), по космоснимку «Landsat TM», который был сделан 18 мая 2001 года. Надежность классификации указанных классов по снимку «Landsat TM», который был сделан в июне (19.06.2001), несколько ниже. В некоторых случаях яровые зерновые культуры были ошибочно отнесены к озимым. Но хорошо выделяются другие сельскохозяйственные культуры — сахарная свекла, подсолнечник, кукуруза, которые на майском снимке совершенно не различались и были отнесены к одному классу — чистых паров и почв с редкой растительностью (всходы свеклы, подсолнечника, гречихи, кукурузы).

Далее было проведено совмещение классифицированного космоснимка «Landsat TM» (18.05.2001) с фрагментом снимка AVHRR NOAA, который был сделан 16.05.2001 г., т. е. в тот же момент вегетации зерновых культур (рис. 2, 3).

Анализ совмещенного изображения показал принципиальную возможность детального сопоставления сигнатур по пикселям космоснимка AVHRR NOAA для разных классов растительности, и в первую очередь зерновых культур с распределением площадей их посевов. При таком сопоставлении наблюдаются существенные отличия по спектральным яркостям у различных классов растительности. Чистые пары и посевы с низким проективным покрытием имеют отрицательные значения NDVI. Площади, занятые озимой пшеницей и многолетними травами, характеризуются положительными наиболее высокими величинами этого индекса и отличаются в среднем на 0.4 ед. по сравнению с парами.

Рис. 2. Совмещение фрагмента классифицированного снимка «Landsat TM» (18.05.2001 г.) (повернут под углом) с фрагментом снимка AVHRR NOAA (16.05.2001 г.) южных районов Киевской области. Светлые участки на изображении «Landsat TM» — площади озимой пшеницы

Рис. 3. Увеличенное совмещенное изображение фрагмента классифицированного снимка «Landsat TM» (18.05.2001 г.) с фрагментом снимка AVHRR NOAA (16.05.2001 г.) района детальных полигонных исследований (Мироновский район Киевской области). Светлые участки — поля озимой пшеницы

Для посевов ярового ячменя и гороха характерны промежуточные значения NDVI. Эти различия спектральных характеристик растительности позволяют оптимистично оценивать возможность обработки снимков AVHRR NOAA с целью решения следующих задач: 1) надежно установить площади, которые заняты посевами озимой пшеницы, 2) построить регрессионные модели, которые должны значительно повысить качество и надежность прогнозирования урожайности зерновых культур на региональном уровне.

ВЫВОДЫ

1. Использование спутниковых данных, в частности снимков AVHRR NOAA, позволяет получить быстрый и достаточно надежный прогноз урожайности зерновых культур, что необходимо для принятия решений в области экономики сельского хозяйства и планирования продовольственной безопасности. В настоящее время ряд стран ведут работы по усовершенствованию системы оптимального мониторинга вегетации растительности, что позволит одновременно проводить надежную оценку урожайности.

2. Системы прогнозирования урожайности, согласно литературным данным, базируются главным образом на использовании снимков AVHRR NOAA и определении индекса NDVI с последующим его интегрированием для периода вегетации и сопоставления с архивными данными по урожайности и агрометеорологической информацией.

3. Системы оценки урожайности, основанные на суммарных подекадных значениях индекса NDVI, в условиях Киевской области неприменимы из-за малого количества безоблачных дней.

4. Установлена зависимость между усредненным суммарным значением NDVI за основной период вегетации (апрель—июль) и средней урожайностью озимой пшеницы. Показано, что характер этой зависимости разный в районах с урожайностью менее 10 ц/га, 10—20 ц/га и более 20 ц/га. Это связано с отличиями природных условий в этих районах.

5. Анализ полноформатных данных AVHRR NOAA за 2001 г. свидетельствует о возможности применения их как для установления площадей, которые заняты посевами озимой пшеницы, так и для построения регрессионных моделей, что должно значительно повысить качество и надежность прогноза урожайности зерновых культур на региональном уровне.

Таким образом, в условиях Киевской области и всей Украины для регионального прогноза урожайности озимой пшеницы можно использовать материалы многозональной съемки сканером AVHRR со спутников NOAA, но это требует решения целого ряда вопросов методики.

1. Bochenek Z. Operational use of NOAA data for crop condition assessment in Poland. In Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21 st Century/Valladolid/ Spain/ 31 may — 2 jun 1999: 2000.—P. 387—392.
2. Bullok P. R. Operational estimates of Western Canada grain production using NOAA AVHRR LAC data // Canadian Journal of Remote Sensing.—1992.—18, N 1.—P. 23—25.
3. Illera P., Delgado J. A., Fernandez Unzueta &. A, Fernandez Manso A. A. Integration of NOAA-AVHRR and meteorological data in a GIS-Application for vegetation monitoring in Castilla y Leon, Spain. In Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21 st Century/Valladolid/ Spain/ 31 may — 2 jun 1999.— 2000.—P. 47—54.
4. Kumar K. and Monteith G. L. Remote sensing of Crop Growth, In Plants and the Daylight Spectrum, edited by Smith, H. (London: Academic Press), 1981.—P. 133—144.
5. Prince S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data // Int. J. of Remote sensing.—1991.—6.—P. 1313—1330.
6. Rasmussen M. S. Assessment of millet yield and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR // Int. J. of Remote sensing.—1992.—18.—P. 3431—3442.
7. Rasmussen M. S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data reduction of environmental and inter annual variability // Int. J. of Remote sensing.—1997.—18.—P. 1059—1077.
8. Rasmussen M. S. Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information: Part 1. Assessment of net primary production // Int. J. of Remote sensing.—1998.—19.—P. 97—117.
9. Rasmussen M. S. Developing simple, operational, consistent NDVI — vegetation models by applying environmental and climatic information. Part 11: Crop yield assessment // Int. J. of Remote sensing.—1998.—19.—P. 119—139.
10. Ruimy M. S., Saugier B. and Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely-sensed data // J. Geophys. Res.—1994..—D3.—P. 5263—5283.
11. Steven M. D. and Demetriades-Shah T. H. Spectral indices of crop productivity under condition of stress. In Advances in Digital Image Processing, (Nottingham: Int. J. of Remote Sensing Society).—1987.—18.—P. 593—601, 3431—3442.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 255—262

Применение методов дистанционного зондирования Земли для оценки состояния растительного покрова

Н. И. Кобец[1], **О. А. Войнов**[2]

[1]Международная ассоциация «Украинский центр менеджмента земли и ресурсов», Киев
[2]Институт агроэкологии и биотехнологии УААН, Киев

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы исследования окружающей среды в силу своей большой обзорности незаменимы для мониторинга и комплексного анализа многих явлений и процессов. В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) как отрасль научных исследований переживает бурное развитие. В связи с этим аэрокосмические методы оценки состояния растительного покрова находят все более широкое применение для решения самых разнообразных задач: от оценки состояния и продуктивности культурных растений и оптимизации сельскохозяйственной практики в пределах отдельно взятого поля (технологии «точного земледелия» — Precision Farming) до оценок динамики развития, состояния и продуктивности растительного покрова в глобальных масштабах (на уровне регионов и континентов).

Тем не менее, несмотря на наблюдаемый сейчас бум в области информационных и аэрокосмических технологий и растущую популярность методов ДЗЗ, есть определенный разрыв между теоретическими исследованиями, научно-исследовательскими разработками и практическим применением результатов этих исследований для решения многих, и в частности агроресурсных, задач. Так, несмотря на то, что дистанционные исследования агроресурсов ведутся уже в течение многих лет, большинство из них по-прежнему пребывают либо на стадии чисто научно-исследовательских разработок, либо на стадии демонстрационных проектов. Для практического использования методов ДЗЗ в системе мониторинга состояния растительного покрова необходимо решение еще очень многих проблем методологического, технического, экономического и организационного характера.

Настоящая статья не претендует на полноту, а является всего лишь попыткой дать наиболее общие представления о круге решаемых задач, современных методах тематической интерпретации данных ДЗЗ в интересах оценки состояния растительного покрова и тенденциях развития этой отрасли научных знаний.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТКЛИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Взаимодействие электромагнитного излучения с растительным покровом имеет достаточно сложный характер. Поскольку при этом можно выделить отраженный, поглощенный и прошедший через растительный слой потоки лучистой энергии, то подстилающую поверхность следует рассматривать скорее как систему «почва—растительность». В этом случае согласно современным представлениям [5, 4, 7] свойства электромагнитного светового потока, отраженного от системы «почва—растительность» определяются в основном пятью факторами:

— оптическими свойствами листьев и других фитоэлементов растений, которые весьма вариабельны во времени и существенным образом зависят от параметров окружающей среды,

— структурой (архитектоникой) растительного покрова (густота стояния растений, площадь листовой поверхности, преимущественная ориентация листьев, степень проективного покрытия почвы растениями), которые также изменяются в течение вегетационного периода,

— отражательной способностью почвы, которая зависит от типа почвы (гранулометрический состав, содержание гумуса), наличия на поверхности мульчирующего слоя (растительных остатков), степени и вида обработки, влажности и других факторов,

— условиями съемки (облачность, соотношение

© Н. И. КОБЕЦ, О. А. ВОЙНОВ, 2002

прямой и рассеянной радиации, азимут визирования по Солнцу, направление рядков (для пропашных сельскохозяйственных культур),

— параметрами атмосферного пропускания (длина оптического пути, характер рассеяния (рассеяние Ми, Рэлея или неселективное рассеяние), что обусловлено размерами атмосферных частиц (молекулы газов, пылевые частицы, аэрозоли, капли влаги и т. д.).

Каждый из указанных факторов оказывает преимущественное влияние на ту или иную характеристику отраженного от системы «почва—растительность» светового потока. Так, отражение от фитоэлементов и от почвы обусловливает спектральное распределение интенсивности отраженного сигнала, а архитектоника и условия освещения — пространственное.

Основним фитоэлементом, определяющим спектральный отклик растительности являются листья растений, которые отражают, поглощают и пропускают падающее излучение способом, характерным для пигментированных клеток, содержащих водные растворы [1]. С оптической точки зрения лист представляет собой чрезвычайно сложную гетерогенную систему, сильно рассеивающую лучистую энергию. Относительно низкая отражательная способность листьев в видимой области спектра, равно как и низкое пропускание, обусловлено поглощением света пигментными системами листа, в особенности в синей (около 450 нм) и в красной (около 670 нм) областях спектра [1, 3, 12, 16].

Поглощение энергии в области физиологически активной радиации (ФАР, $\lambda\lambda$ 350—750 нм) определяется главным образом хлорофиллом и каротеноидами. При этом поглощение каротеноидами ощутимо лишь в области 350—550 нм, а в области длин волн больше 550 нм практически все поглощение может быть приписано хлорофиллу [12]. В ближней ИК-области наблюдается заметное возрастание отражательной способности листьев (до 40—50 %), что обусловлено многократными внутренними отражениями в структуре мезофилла, возникающими вследствие различий показателей преломления оболочек клеток и внутритканевых воздушных полостей [16].

Участок спектра отражения растительности в диапазоне 680—750 нм часто называют «красным краем». Многочисленными исследованиями было установлено, что положение длины волны «красного края» отражения, определяемое как положение максимума первой производной от функции отражения, не является постоянной во времени характеристикой. При оценке состояния культурной растительности выделяют два периода развития растений, границей между которыми является конец фазы колошения—начало фазы цветения. Первый

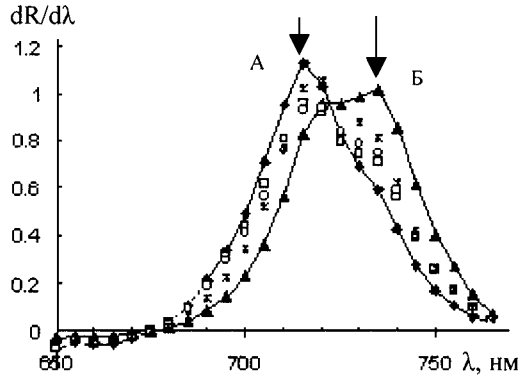


Рис. 1. Длинноволновой сдвиг положения «красного края» отражения листьев пшеницы (А — выход в трубку, Б — колошение)

период характеризуется усиленным ростом растений (накоплением биомассы) и увеличением содержания пигментов в листьях, при этом увеличивается проективное покрытие, так что вклад почвы в отражение от системы «почва—растительность» в случае оптически плотного растительного покрова уменьшается почти до нуля. В течение второго периода происходит незначительное уменьшение биомассы (за счет потери воды и частичного отмирания некоторых фитоэлементов) и существенное снижение концентрации пигментов.

В первую половину вегетации по мере накопления хлорофилла происходит сдвиг положения «красного края» в длинноволновую область спектра (рис. 3), а во вторую половину вегетации при уменьшении содержания хлорофилла в органах растений — в коротковолновую. Таким образом, положение длины волны «красного края» отражения растительности является информативным параметром для определения фенологических характеристик растительности [6].

Развитие и физиологическое состояние отдельного растения и растительного сообщества в целом в значительной мере определяется влиянием ряда внешних факторов. Эти факторы можно сгруппировать следующим образом:

— факторы внешней среды (географические и гидрометеорологичекие), такие как особенности рельефа и почвенного покрова, засуха, заморозки, шквальные ветры, недостаток или переизбыток влаги и т. д.,

— биологические факторы — поражения разнообразными вредителями (насекомыми, грызунами), заболевания растительности различной этиологии или угнетение посевов сорняками,

— антропогенные факторы — загрязнение с/х угодий токсикантами (тяжелые металлы, радионуклиды, пестициды), нарушение сельскохозяйственной практики (несоблюдение норм высева, недоста-

ток основных элементов питания и т. д.).

Воздействие факторов внешней среды приводит к целому ряду физиологических и морфологических изменений как у отдельно взятого растения (микроуровень), так и у растительного сообщества в целом (макроуровень).

На микроуровне растения реагируют изменением количественного и качественного содержания пигментов, структуры мезофилла, а также изменениями свойств поверхности листьев и влагосодержания в них. Такая реакция всегда находит свое изменение в изменении спектрального отклика растительности, становясь особенно очевидной, если экстремальным состоянием окружающей среды растения переведены в стрессовое состояние.

Как правило, физиологический стресс у растений находит свое выражение в торможении процессов пигментообразования, что приводит к уменьшению концентрации хлорофилла в листьях. Это явление называется «хлороз». Как следствие происходит поглощение листом лишь незначительной части светового потока в голубой и красной зонах спектра. При этом доля отраженного светового потока в видимом диапазоне возрастает. Содержание влаги и морфология фитоэлементов подвержены влиянию факторов внешней среды в значительно меньшей степени.

На макроуровне основными параметрами, формирующими спектральный отклик растительности и наиболее подверженными влиянию стрессовых факторов, являются биомасса и архитектоника растительного покрова. Нарушение физиологических процессов на микроуровне, проявляющееся в ингибировании процессов пигментообразования и снижении фотосинтетической активности хлорофилла, в конечном счете приводит к снижению биологической продуктивности фитоценоза и уменьшению растительной биомассы. Кроме того, произрастание растений в неблагоприятных условиях может проявляться в следующих изменениях:

— изменение видового состава естественных растительных ассоциаций;
— мутационные явления;
— нарушение роста и развития растений;
— фенологические сдвиги.

Последние две группы изменений в растительных сообществах обусловлены генетически, так как генетически контролируемые фенологические циклы тесно связаны с ростовыми процессами. Все перечисленные изменения неизбежно проявляются в нарушениях архитектоники растительного покрова: изменении степени проективного покрытия (ПП) почвы растениями, преимущественных углов ориентации фитоэлементов, листового индекса.

Следует отметить, что изменения коэффициентов спектрального отражения, вызванные недостатком или избытком элементов питания, тяжелых металлов, пестицидов, водным стрессом или заболеванием растений, имеют сходный характер, что усложняет задачу идентификации типа стресса только на основе спектральных измерений и требует проведения на участках съемок дополнительных ботанических, биофизических и биохимических исследований.

Как правило, воздействие стрессовых факторов (независимо от вида) приводит к целому ряду физиологических и морфологических изменений как у отдельно взятого растения, так и у растительного сообщества в целом. Под воздействием совокупности указанных изменений происходит существенное изменение спектральных характеристик отраженного фитоценозом светового потока, что может быть зафиксировано дистанционными методами.

Таким образом, спектральный отклик находящейся в стрессовом состоянии растительности отличается от спектрального отклика здоровых растений, находящихся в той же самой фазе развития.

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Дистанционные методы оценки состояния растительного покрова (в том числе и сельскохозяйственных угодий) развиваются в двух направлениях: визуальные оценки и инструментальные измерения. Как правило, визуальные методы оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур используются для приблизительной (в баллах) оценки таких параметров состояния культурной растительности, как ПП, изреженность, повреждение вредителями, засоренность, равномерность и степень созревания [2, 8]. Так, например, аэровизуальные оценки состояния посевов успешно применялись в Молдавии. Эти работы были основаны на качественной оценке таких параметров состояния посевов, как изреженность и ПП. Под изреженностью посева подразумевают отношение нерегулярных просветов почвы к площади поля, выраженное в процентах. Данный признак относится к негативным явлениям, возникающим при нарушении правил агротехники, повреждении вредителями и болезнями или действии неблагоприятных климатических условий. ПП — это вертикальная проекция надземных органов растений на почву, также выраженная в процентах. Этот признак, в отличие от понятия об изреженности, указывает на регулярные просветы почвы в рядках и междурядьях и характеризует фенологическую фазу развития растений и степень развития листового аппарата, которая тесно связана с конечной продуктивностью

Таблица 1. Аэровизуальная оценка состояния посевов кукурузы (для периода развития «выметывание метелки»)

Оценка	ПП, %	Площадь листьев, 10^3 м^2/га
Отлично	25—30	3.0—3.5
Хорошо	17—24	2.0—2.5
Удовлетворительно	12—16	1.3—1.7
Плохо	10—12	0.9—1.2
Очень плохо	8—10	0.5—0.8

посева. Оценки состояния посевов кукурузы, каждому из которых соответствует определенное значение ПП и площади листьев, приведены в табл. 1, взятой из работы [2].

Аэровизуальные методы оценки состояния сельскохозяйственных угодий имеют вполне самостоятельное значение, однако, в силу своей дороговизны, субъективности и низкой точности, они не могут быть использованы для мониторинговых работ и для решения задач прогностического характера.

В настоящее время более широко используются инструментальные дистанционные методы получения информации о растительном покрове, подавляющее большинство которых основано на регистрации изменений параметров электромагнитного излучения, возникающих при его взаимодействии с растительным покровом.

Большинство сенсорных систем, применяющихся для дистанционного зондирования растительного покрова измеряют и регистрируют интенсивность и частоту отраженного от подстилающей поверхности электромагнитного излучения. Зарегистрированный частотный спектр объекта затем сравнивается со стандартными спектрами (или спектрами определенных объектов), что позволяет решать задачи идентификации и классификации объектов подстилающей поверхности.

В зависимости от способа базирования сенсорных систем дистанционные методы оценки состояния растительного покрова делятся на:

— наземные;

— авиационные (приземные и высотные);

— космические.

Наземное спектрометрирование растительности проводится оператором с помощью ручных (переносных) приборов или с использованием автономной стационарной аппаратуры со специальных площадок (треног, вышек, выносных кранов и т. п.). Такие работы в основном носят исследовательский характер и, в силу невысокой степени осреднения получаемой информации, почти не используются для решения практических задач оценки состояния сельскохозяйственных угодий. Однако как вспомогательные (заверочные) измерения такие методы довольно широко применяются при разработке методик тематической интерпретации результатов авиационных и космических съемок. В последние годы в связи с развитием таких новых технологий, как, например, прецизионное сельское хозяйство, спектральные приборы (датчики) зачастую устанавливают непосредственно на сельскохозяйственном оборудовании. Это позволяет в пределах отдельного сельскохозяйственного поля с высокой точностью оценивать влажность растительного покрова, распределение биомассы, места локализации сорной растительности или участки с недостаточным уровнем минерального питания растений.

Авиационные съемки проводятся с борта летательных аппаратов, в качестве которых могут выступать авианосители, специально предназначенные для проведения съемочных работ (Ан-30) или обыкновенные легкомоторные самолеты и вертолеты, оборудованные соответствующей аппаратурой. Реже применяются беспилотные радиоуправляемые летательные аппараты, мотодельтапланы и дирижабли. Однако, несмотря на то, что авиадистанционное зондирование растительности по уровню обзорности значительно превышает наземные методы и может быть использовано в системах мониторинга состояния посевов в масштабах отдельных хозяйств или районов, оно не получило до настоящего времени широкого развития, прежде всего в силу его высокой стоимости и слабого методического обеспечения. Отдельные примеры использования авиадистанционных методов для решения практических задач сельскохозяйственного назначения можно встретить только в США, Австралии, Германии, Великобритании, Японии и Канаде.

В настоящее время основным источником информации о состоянии растительного покрова, являются сенсорные системы космического базирования. При этом наиболее широко используется информация со спутников серий «Landsat», «Spot», NOAA и IRS.

Для обработки и тематической интерпретации получаемой в результате проведения инструментальных съемок информации (панхроматических и спектрозональных изображений, спектральных распределений яркости растительных объектов и т. д.) в основном применяются методы основанные на:

— классификации объектов на регистрируемых изображениях,

— детекции изменений спектрального отклика растительности во времени,

— использовании концепции вегетационных индексов.

На использовании концепции вегетационных индексов мы остановимся несколько подробнее.

ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Многофакторность влияния фазы развития и состояния растительного покрова на его отражательную способность обусловливает трудности тематической интерпретации данных дистанционного зондирования агроресурсов. Поэтому многочисленные исследования были направлены на разработку методов анализа, которые были бы чувствительны к специфическим особенностям вегетирующей растительности и малочувствительными к маскирующим эффектам и случайным изменениям [4].

Концепция вегетационных индексов была развита с целью получения таких параметров растительного покрова, как тип растительности, индекс листовой поверхности (Leaf Area Index — LAI), ПП, высота растений, биомасса, содержание пигментов и т. д. Многочисленные формы получения десятков вегетационных индексов основаны либо на отношениях или на линейных комбинациях сумм и разностей измерений на разных длинах волн, либо на системе ортогональных преобразований. Согласно [7] все эти комбинации в конечном счете основаны на использовании ряда характерных особенностей отражательной способности почв и растительности:

— монотонное возрастание (с увеличением длины волны) отражения почв,

— характерный максимум отражения вегетирующей растительности в области длин волн 0.5—0.6 мкм,

— минимум отражения растительности в области 0.68 мкм, обусловленный главной полосой поглощения хлорофилла,

— вторичный максимум отражения растительности на длинах волн более 0.8 мкм (так называемое «инфракрасное плато отражения»),

— большие значения отражения желтой растительности по сравнению с отражением от почвы и т. д.

Наибольшее распространение при решении практических задач дистанционного зондирования растительного покрова получил вегетационный индекс, названный «нормализованной разностью» (Normalised Difference Vegetation Index — NDVI) вида:

$$NDVI = (R_к - R_{ик})/(R_к + R_{ик}),$$

где $R_к$ и $R_{ик}$ — отражение от объекта в красной и ИК-области спектра соответственно.

Проведение ортогональных преобразований для четырех каналов сенсора MSS спутника «Landsat-4» привело к разработке целого ряда вегетационных индексов:

— Brightness (индекс яркости почвы) — для приспособления линии регрессии соответствующих наборов данных к условиям почвы без растений:

$$B = 0.332CH_1 + 0.603CH_2 + 0.675CH_3 + 0.262CH_4;$$

— Greenness (фактор зеленого цвета)— для связи полученных почвенных линий регрессии с максимумом спектрального отражения, характерным для зеленой вегетирующей растительности:

$$G = -0.283CH_1 - 0.660CH_2 + 0.577CH_3 + 0.388CH_4;$$

— Yellowness (фактор желтизны) — для диагностики замутнения атмосферы над растительным покровом при анализе спутниковых данных:

$$Y = -0.899CH_1 + 0.428CH_2 + 0.076CH_3 - 0.041CH_4,$$

где CH_1, CH_2, CH_3, CH_4 — величина регистрируемого сигнала отражения в каналах сенсора MSS («Landsat») с первого по четвертый.

Одним из важнейших параметров состояния культурной растительности является содержание пигментов в листьях, которое определяет эффективность использования растениями фотосинтетически активной радиации и, в конечном счете, продуктивность агроценоза. Поэтому в последнее время особое внимание уделяется разработке новых вегетационных индексов для определения не только общего содержания хлорофилла в растениях, но также отдельных его форм, а также каротеноидов. Были предложены простые индексы-отношения названные пигмент-специфическими простыми отношениями (Pigment Specific Simple Ratio — PSSR):

$$PSSR_a = R_{800}/R_{675}\ (r^2 = 0.9644),$$
$$PSSR_b = R_{800}/R_{650}\ (r^2 = 0.9639),$$
$$PSSR_c = R_{800}/R_{500}\ (r^2 = 0.942),$$

а также пигмент-специфические индексы типа нормализованной разности (Pigment Specific Normalised Difference — PSND):

$$PSND_a = (R_{800} - R_{675})/(R_{800} + R_{675})\ (r^2 = 0.9043),$$
$$PSND_b = (R_{800} - R_{650})/(R_{800} + R_{650})\ (r^2 = 0.9514),$$
$$PSND_c = (R_{800} - R_{500})/(R_{800} + R_{500})\ (r^2 = 0.9036),$$

где R — величина отражения на соответствующей длине волны [9, 10], индекс (a, b, c) указывает на определение хлорофилла—а, хлорофилла— б и каротеноидов, соответственно, а r^2 — коэффициент детерминации.

Развитие указанной концепции вегетационных индексов на любое число спектральных каналов позволило усовершенствовать процедуру мультиспектральных измерений для оценки состояния почвенно-растительного покрова. В частности, линейная комбинация шести каналов сенсора TM спутника «Landsat» в видимой области спектра оказалась более чувствительной к вегетирующей растительности, чем данные сенсора MSS, сенсора HRV спутника «Spot» и сканирующих радиометров AVHRR спутников серии NOAA.

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРОЕКТЫ MARS И MERA

В 1988 г. в странах Европейского Сообщества был начат проект, получивший название MARS (Monitoring of Agriculture with Remote Sensing). Основными заказчиками и потребителями конечной продукции этого проекта выступали Головное управление сельского хозяйства Европейской комиссии (European Commission Directorate General for Agriculture — DG VI) и Европейское статистическое бюро (EUROSTAT). В выполнение этого проекта были вовлечены около 100 различных организаций из стран-участников ЕС. Блок работ по мониторингу состояния сельскохозяйственных угодий и раннему прогнозированию урожайности основных культур выполнялся Объединенным исследовательским центром, расположенным в итальянском городе Испра (Joint Research Center, Ispra).

Исследовательские работы в рамках проекта MARS проводились в пяти направлениях [13]:

— региональные оценки (определение площадей, занятых различными с/х культурами с помощью спутниковых снимков высокого пространственного разрешения — «Spot-HVR» и «Landsat-TM»),

— быстрая сравнительная оценка в общеевропейском масштабе площадей занятых основными культурами (по сравнению с предыдущими годами),

— разработка экспериментальной сельскохозяйственной информационной системы (Advanced Agricultural Information System), которая сочетает использование спутниковых снимков низкого пространственного разрешения (NOAA-AVHRR) с агрометеорологическими моделями развития посевов, такими как CGMS (Crop Growth Monitoring System),

— оценка урожайности с/х культур в сопредельных странах,

— разработка новых технологий и методов тематической интерпретации спутниковых мультиспектральных съемок, а также оценка пригодности данных новых поколений сенсорных систем (радарные снимки) для целей мониторинга сельскохозяйственных ресурсов.

На рис. 2 и 3 приводятся результаты сопоставления результатов по определению площадей и оценке урожайности озимой пшеницы в Венгрии.

Успешное выполнение работ по проекту MARS способствовало тому, что было принято решение о продолжении этого проекта, получившего новое название MERA (MARS and Environmental Related Applications). Финансирование нового проекта осуществлялось в рамках программы PHARE — инициативы ЕС по поддержке новых демократических государств. Проект MERA осуществляется в несколько этапов. Так, первый этап, названный MERA-92, выполнялся в шести странах (табл. 2).

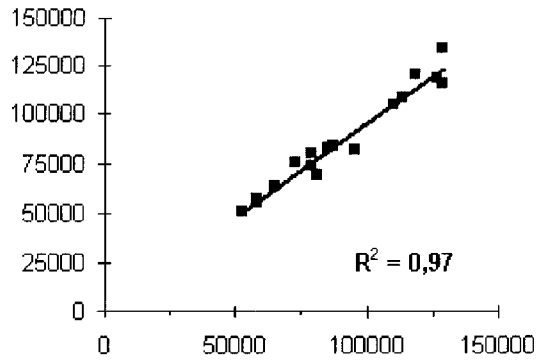


Рис. 2. Сравнение площадей (га) под озимой пшеницей в Венгрии по данным Комитета статистики (Y) и спектрозональных съемок (X) в рамках программы MARS [11]

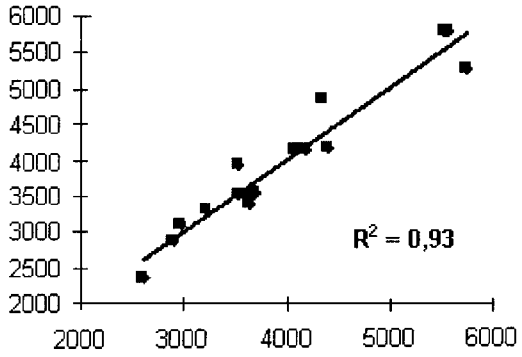


Рис. 3. Сравнение урожайности (кг/га) озимой пшеницы в Венгрии по данным Комитета статистики (Y) и спектрозональных съемок (X) в рамках программы MARS [11]

Таблица 2. Страны-участники проекта MERA-92

Страна	Обслед. площадь, км^2; (%)	Кол-во обслед. сегментов
Польша	29161; (9.3)	227
Венгрия	21711; (23.3)	491
Болгария	23865; (21.5)	350
Румыния	41828; (7.5)	239
Чехия	78846; (100)	806
Словакия	6760; (13.8)	189

Основные работы по проекту MERA-92 проводились в четырех направлениях [14]:

— региональные оценки, основанные на методике площадной выборки (Area Frame Sampling Techniques),

— агрометеорологическое моделирование, оценка состояния посевов и прогноз урожайности основных культур,

— картирование и мониторинг лесных экосистем,

— картирование и мониторинг эрозии/деградации почв.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ АГРОРЕСУРСОВ В США

Одним из крупнейших в США пользователей данных ДЗЗ является Совет по наблюдению за мировыми агроресурсами (The World Agricultural Outlook Board — WAOB). Этот Совет планирует и координирует всю деятельность в области дистанционного зондирования для Департамента сельского хозяйства США (United States Department of Agriculture — USDA). Подразделения USDA используют данные дистанционного зондирования для оценки состояния сельскохозяйственных угодий, мониторинга, управления и администрирования природными ресурсами, а также для проведения исследований в области дистанционного зондирования. Кроме того, через свое подразделение — Национальную службу сельскохозяйственной статистики (National Agricultural Statistics Service — NASS) USDA предоставляет пользователям агростатистическую информацию. NASS проводит обследования по оценке продуктивности основных культур в США и предоставляет пользователям информацию об уровне производства, затратах и доходности сельскохозяйственных предприятий. Государственные, федеральные и местные органы власти используют эту информацию для формирования общественной политики и законодательной базы в целях контроля за производством, хранением и потреблением сельскохозяйственной продукции.

Каждые две недели специалисты NASS получают от Национальной администрации по изучению океана и атмосферы (National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA) данные спутниковых съемок. Для оценки состояния посевов космические снимки спутников NOAA обрабатываются Геологической службой США (United States Geological Survey — USGS) путем расчета вегетационных индексов, характеризующих жизнестойкость посевов. Специалисты NASS проводят сравнение данных текущего года с соответствующими вегетационными индексами предыдущих лет. Эти сравнения носят исключительно качественный характер, поскольку технология перевода используемых индексов в количественные характеристики сельхозяйственных угодий до сих пор не доведена до уровня практического использования.

В США также создана специальная служба, которая занимается сбором и предоставлением статистической информации о состоянии и урожайности сельскохозяйственных культур во всех странах мира (Foreign Agricultural Service — FAS). FAS анализирует ежегодно около 10 000 мультиспектральных спутниковых изображений. При этом используются специально разработанные прогностические модели с использованием спутниковой информации и гидрометеорологических данных для прогноза урожая, определения фазы развития растений, влажности почвы и оценки погибших после перезимовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если проанализировать уровень развития технологий ДЗЗ и состояние их практического применения в Украине (не только для оценки состояния растительного покрова), то можно сделать несколько выводов. Основными проблемами на наш взгляд являются следующие:

— отсутствие стабильной финансовой поддержки исследований в области ДЗЗ, вследствие чего практически не ведутся работы по методическому обеспечению использования данных ДЗЗ в народно-хозяйственных целях;

— недостаточный уровень популяризации дистанционных технологий и дороговизна конечных продуктов, что сдерживает развитие рынка потребителей и рынка услуг;

— отсутствие государственной системы подготовки высококвалифицированных специали-стов в области фотограмметрии, дистанционного зондирования и ГИС-анализа;

— существующие в настоящее время ограничения на использования данных ДЗЗ связанные с режимом секретности.

Анализ современной литературы позволяет сформулировать важнейшие факторы, которые в настоящее время определяют развитие аэрокосмических методов мониторинга растительного покрова. Прежде всего, к ним относится следующее:

— интенсивное развитие материально-технической базы для проведения таких работ: (создание нового поколения сенсорных систем авиационного и космического базирования, таких как гиперспектральные сенсорные системы, видеоспектрометрические системы, лазерные лидарные системы, всепогодные радарные системы),

— появление новых спутниковых систем, в том числе высокого пространственного разрешения («Landsat-7», «Spot-5», IRS, «Ikonos», «QuickBird»),

— развитие широкой сети государственных и коммерческих организаций и компаний (в том числе частных), которые не только предоставляют материалы аэрокосмических съемок, но также оказывают услуги по их обработке и тематической интерпретации для нужд конкретного пользователя,

— все более широкое внедрение в повседневную практику таких передовых технологий как использование систем глобального позиционирования (GPS), географических информационных систем

(GIS), современные информационные технологии (Internet-системы доступа к удаленным базам данных),

— активная кооперация в рамках целого ряда международных программ, финансируемых как Европейским Союзом, так и Международным Содружеством.

Для ознакомления с деятельностью ряда международных организаций и компаний, работающих в области применения данных аэрокосмического зондирования для решения задач оценки состояния сельскохозяйственных угодий рекомендуется посетить следующие сайты:

http://www.amesremote.com
http://www.geosys-intl.com
http://www.pcigeomatics.com
http://www.modernag.com
http://www.possys.com
http://verde.dtn.com

1. Брандт А. Б., Тагеева С. В. Оптические параметры растительных организмов. — М.: Наука, 1967.—301 с.
2. Войнов О. А., Бех Л. Т. Аэровизуальная оценка состояния и продуктивности посевов озимой пшеницы и кукурузы // Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве. — Киев: Наук. думка, 1989.—С. 90—92.
3. Клешнин А. Ф. Растение и свет. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.—456 с.
4. Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Федченко П. П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.—229 с.
5. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982.—216 с.
6. Кочубей С. М., Кобец Н. Н., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—135 с.
7. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Методологические и экспериментальные основы использования оптических свойств почвенно-растительных объектов при определении параметров растительности // Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве. — Киев: Наук. думка, 1989.—С. 33—40.
8. Руководство по проведению визуальных авиамаршрутных агрометеорологических обследований. — М.: Гидрометеоиздат, 1971.—103 с.
9. Blackburn G. A. Evaluating spectral indices for tracking phenological changes in canopy pigment composition // Proc. of 23rd Annual Conf. Remote Sensing Society, 2—4 September 1997. — UK: Reading, 1997.—P. 94—99.
10. Chappelle E. W., Kim M. S., McMurtrey J. E. Ratio analysis of reflectance spectra: an algorithm for the remote estimation of the concentration of chlorophyll A, B and carotenoids in soybean leaves // Remote Sensing of Environment.—1992.—**39**.—P. 239—247.
11. Csornai G., dr. Dalia O., Farkasfaly J., Nődor G. Crop Inventory Studies Using Landsat Data on Large Area in Hungary // Appl. Remote Sensing Agriculture. — Butterworths, 1990.—P. 159—165.
12. Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J. S., Weidner V. R. Spectral properties of plants // Appl. Opt.—1965.—**4**, N 1.—P. 11—20.
13. Joint Research Centre, The MARS Project: Overview and Perspectives, 1994, EUR 15599, EN, Luxemburg.
14. MERA National Focal Points, 1995, MERA-92 Project Interim and Final Reports. (4 activities), Warsaw, Sofia, Prague, Bratislava, Bucharest, Budapest.
15. Vogelmann J. E., Rock B. N., Moss D. M. Red edge spectral characterization of phenological change and insect related damage in sugar maple leaves // Internat. J. Remote Sensing.—1993.—**14**.—P. 1563—1575.
16. Wooley J. T. Reflectance and transmittance of light by leaves // Plant. Physiology.—1971.—**47**, N 5.—P. 656—662.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 263—270

Особенности применения многочастотной радиолокационной информации при дистанционных исследованиях аграрных территорий

С. Е. Яцевич[1], В. К. Иванов[1], Е. И. Яцевич[1], А. В. Шатохин[2]

[1]Институт радиофизики и электроники НАН Украины ім. А. Я. Усикова, Харьков

[2]Национальный центр Институт грунтоведения и агрохимии УААН им. А. Н. Соколовського, Харьков

Для рационального использования природных ресурсов, экологического мониторинга покровов суши необходимо разработать и ввести в практику природопользователей дистанционные методы определения характеристик почвенного и растительного покровов, различного рода проявлений антропогенного характера на эти подстилающие поверхности. Актуальность решения этих задач не вызывает сомнения, так как традиционные методы контактных измерений обеспечивают получение информации с недостаточной для большинства практических задач детальностью в пространстве и времени и, кроме того, оказываются трудоемкими.

Решение всех указанных выше проблем невозможно без внедрения дистанционных методов исследования Земли, основанных на анализе структуры сигналов, сформированных в результате отражения или излучения электромагнитных волн природными образованиями. Для получения наиболее полной информации об изучаемых подстилающих поверхностях необходимо использовать широкий спектр электромагнитных колебаний, поскольку разные его участки содержат различную информацию об окружающей среде. Достаточно интенсивно используются данные оптического и инфракрасного диапазонов, позволяющие выделить информацию о состоянии растительного покрова и земной поверхности (оптический диапазон), о ее температуре, скрытых пожарах, утечках нефти и газа (инфракрасный диапазон). Существенным недостатком этих диапазонов является зависимость от погоды, так как облачность и темное время суток не позволяют получить информацию о состоянии поверхности. Радиофизические методы дистанционного зондирования свободны от этих недостатков и отличаются высокой проникающей способностью. Эти методы основаны на связи геометрических и электрофизических характеристик поверхностных и подповерхностных образований с параметрами отраженных или излученных поверхностью сигналов.

РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН ПОЧВАМИ И РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

При радиолокационных методах изучения системы, включающей растительный покров и почву, на которой он произрастает, удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) выглядит как [7, 9]:

$$\sigma^0_\Sigma(\theta) = \sigma^0_p(\theta) + \sigma^0_п(\theta)/L^2(\theta), \qquad (1)$$

где $\sigma^0_p(\theta)$ — УЭПР растительного покрова; $\sigma^0_п(\theta)$ — УЭПР почвы, $L(\theta)$ — коэффициент ослабления электромагнитного поля в слое растительности.

На частотах свыше 8 Ггц при $\theta \geq 30°$ удельный вклад первого слагаемого оказывается преобладающим, в то время как на более низких частотах и при $\theta = 10...30°$ более заметным является вклад второго слагаемого.

В более сложном, приближенном к реальности, случае обратное рассеяние от этой системы моделируется выражением

$$\sigma^0 = \sigma^0_п + \sigma^0_p + \sigma^0_{int}. \qquad (2)$$

Первое слагаемое в этом случае соответствует модели малых возмущений [8].

Объемное рассеяние растительным покровом определяется эмпирической зависимостью, основанной на использовании усовершенствованной «модели покровного облака» [11]:

© С. Е. ЯЦЕВИЧ, В. К. ИВАНОВ, Е. И. ЯЦЕВИЧ, А. В. ШАТОХИН, 2002

$$\sigma^0_p = 0.742w(1 + 0.536w\tau - 0.237(w\tau)^2) \times$$
$$\times[1 - \exp(-2.119\tau\sec\theta)]\cos\theta, \quad (3)$$

где $w = k_s/(k_s + k_a)$ — альбедо растительного слоя, $\tau = (k_s + k_a)h$ — его оптическая толщина, k_s и k_a — коэффициенты рассеяния и поглощения, h — физическая толщина слоя, θ — угол падения электромагнитного излучения. Взаимодействие поверхность—объем в предположении, что в структуре растительности доминирующими являются случайно распределенные дискообразные рассеивающие элементы (листья), описывается эмпирическим выражением для ГГ поляризации [11]:

$$\sigma^0_{int} = 1.924w\ [1 + 0.924w\tau + 0.398(w\tau)^2] \times$$
$$\times[1-\exp(-1.925\tau\sec\theta)]\exp[-1.372\tau^{1.12}\sec\theta] \times$$
$$\times\exp[-0.836(k\sigma)^2\cos\theta]\,|R_{гг}|^2\cos\theta, \quad (4)$$

где $|R_{гг}|^2$ — коэффициент Френеля.

Такого типа модель пригодна для низкой растительности (соя, клевер и т. п.). В случае же, к примеру, созревшей кукурузы, листья которой высыхают и содержат незначительную часть общего влагосодержания растительного покрова (с точки зрения диэлектрических характеристик) являются вертикально ориентированные цилиндры (стебли), и значение σ^0_{int} определяется более общим выражением

$$\sigma^0_{int}=2\exp[-4(k\sigma)^2\cos^2\theta]\exp(-2\tau\sec\theta)\,|R_{гг}|^2|R_{st}|^2, \quad (5)$$

где $|R_{st}|^2$ — эффективная отражательная способность стеблей растений, величина которой пропорциональна их влагосодержанию.

Для учета вклада второго компонента в выражение (1) практическое применение находят три типа теоретических моделей: Кирхгофа, физической и геометрической оптики (метод касательной плоскости) и метода малых возмущений [1, 2, 12]. Эти модели в общем виде представляют собой произведение двух функций:

$$\sigma^0_{pp}(f, \theta_i) = D_{pp}[\varepsilon_s(f), \theta_i]S[(f, \theta i)], \quad (6)$$

где D_{pp} представляет собой функцию, описывающую диэлектрические свойства среды, зависящую от поляризации и угла облучения; функция S учитывает влияние шероховатости поверхности и описывается в случае рассеяния на случайных изотропных поверхностях одномерной корреляционной функцией $\rho(\xi)$ поверхностного профиля $h(z)$ или спектром поверхностных неровностей.

Использование на ранних стадиях исследований природной среды Земли одночастотных радиолокационных систем не позволило однозначно связать параметры радиолокационного сигнала с параметрами поверхности (шероховатостью, диэлектрической проницаемостью и т. д.), что явно следует из вида уравнений (1), (2), (6), включающих достаточно большое количество переменных величин.

Теоретические и экспериментальные проведенные в ИРЭ НАНУ [3, 5, 10] показали, что разработка многочастотных систем, работающих на нескольких частотах и поляризациях излученного сигнала, с совместной обработкой полученных многоканальных данных, позволит увеличить объемы получаемой информации и приблизиться к определению однозначной связи параметров исследуемых поверхностей с характеристиками рассеянного сигнала СВЧ. Другим путем повышения информативности может служить повторная съемка одних и тех же территорий под одинаковыми углами, проведенная за короткий промежуток времени, либо одновременное наблюдение их под разными углами визирования.

Исследования показали, что излучение миллиметрового (ММ) диапазона взаимодействует с верхним слоем растительного покрова, сантиметровое (СМ) излучение проникает внутрь слоя растительности, достигая почвы, дециметровое (ДМ) и метровое (М) излучение практически не испытывает влияния растительности и проникает в почву на глубину, которая зависит от диэлектрических свойств почвы. Синхронное зондирование во всех этих диапазонах обеспечивает послойное наблюдение почв и растительного покрова, что позволяет по-новому решать задачи дистанционного зондирования аграрных территорий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АГРАРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

С 1981 по 1995 гг. разработанные методы прошли экспериментальную проверку на ряде тестовых полигонов с использованием разработанного в ИРЭ НАН Украины многочастотного радиолокационного комплекса, размещенного на самолете-лаборатории Ил-18 [4]. В состав комплекса входили радиолокаторы с реальной апертурой миллиметрового и сантиметрового диапазонов, дециметрового и метрового диапазонов с синтезированием апертуры. Для комплекса радиолокаторов характерны совмещенные полосы обзора (в среднем 30 км) и согласованное пространственное разрешение (в среднем 20—50 м). Для всех радиолокаторов применена автоматическая бортовая внутренняя калибровка [6]. В состав аппаратуры также входил сканирующий радиометр миллиметрового диапазона с полосой обзора 10 км, пространственным разрешением 100 м с высоты 7000 м.

Летные исследования были дополнены совместными наземными контактными измерениями агрофизических характеристик почв и растительности

на опытных полигонах, гидрометеорологической и другой наземной информацией.

Тестовые полигоны находились на севере, юге, юго-востоке и юго-западе и западе Харьковской области. Общая площадь полигонов составила около 10000 км^2. Исследуемые районы представляет собой лесостепную геосистему с интенсивным сельскохозяйственным использованием земель. Ее динамика характеризуется относительно быстрой сменой состояний, обусловленной как гидрометеорологическими факторами, так и ростом и развитием растительного покрова. Территории полигонов присущ волнистый рельеф, разделенный балками на ряд межбалочных водоразделов. Вершины водоразделов сравнительно узкие, склоны пологие. Расчленяемость массивов, наличие склонов различной крутизны, глубокий базис эрозии обусловили на полигонах интенсивное развитие эрозионных процессов.

Наиболее распространенной почвообразующей породой на территории полигона являются лессовые породы, которые залегают на выровненных участках и склонах местных водоразделов, основной механический состав тяжелосуглинистый. На таких породах сформировались сравнительно плодородные почвы, основной из которых является типичный для северной подзоны степи мощный средне-гумусовый чернозем и реградированные оподзоленные почвы.

Естественная растительность представлена в основном степными злаками и луговыми видами растений, а также культурами сплошного сева. В верховьях оврагов и балок находятся массивы лиственных лесов. На участках развития песчано-боровых террас произрастают сосновые леса.

Высокое разнообразие растительных сообществ на фоне сельскохозяйственных угодий обеспечивает высокую мозаичность радиолокационных изображений полигона, что является благоприятным фактором при установлении основных закономерностей сезонной динамики радиоотражательных характеристик.

Радиолокационная съемка была проведена синхронно с полевыми работами, включающими отбор проб грунта и растительного покрова с их последующей камеральной обработкой.

Параллельно проводились измерения и описание состояния растительного покрова и степени обработки полей (высота растений, площадь проективного покрытия, направление вспашки, глубина борозд, комковатость и пр.

На рис. 1 приведены радиолокационные изображения (РЛИ) тестового полигона в X-, L-, VHF-диапазонах радиоволн. На них отчетливо видны исследуемые поля, разделяющие их лесополосы, овраги, лесные массивы, поселки. Изменение интенсивности тона изображения на полях определяется их состоянием на момент съемки, вызывающим вариации отраженного радиосигнала.

Обработка многочастотной информации была проведена методом парной корреляции путем сравнения контактных данных с данными радиолокаторов различных длин волн.

Оценивались следующие параметры: плотность почвы (до глубины 50 см), содержание физической глины (до глубины 50 см), влажность почвы в % от массы и объема (до глубины 50 см). Использовались геоморфологические характеристики площадок (уклоны, экспозиции высот и пр.), а также такие показатели как емкость нанорельефа и максимальный размер глыб на полях и др.

По итогам вычислений наибольшая корреляция рассеянного сигнала с плотностью грунта наблюдается на глубинах 0—10 и 10—20 см в сантиметровом и дециметровом диапазонах. В метровом диапазоне коэффициент корреляции составляет 0.53—0.56 для слоев 0—10, 10—20, 20—30 см. Из всех характеристик грунта радиолокационные данные наиболее связаны с плотностью грунта в слое 0—10 см, причем этот показатель уменьшает свое влияние на отражательную способность по мере увеличения длины волны радиолокатора.

Наибольшая связь между содержанием объемной влаги обнаружена в слое 0—10 см для дециметрового (0.58) и метрового (0.6) диапазонов. В более глубоких слоях такая зависимость не наблюдается.

Обработка РЛИ позволила оценить связь с содержанием влаги в грунте (в весовых процентах). Эта связь наиболее выражена в сантиметровом диапазоне на глубинах 10—20 и 30—40 см. (r = 0.53).

Для учета комплекса показателей системы «почва—агрофон» использовалась модель в, основе которой лежит уравнение многомерной линейной пошаговой регрессии. Проводилось построение уравнения зависимости РЛ данных по каждому диапазону со следующими переменными: x_1 — объемная влажность агрофона, x_2 — влажность растительности, x_3 — площадь проективного покрытия, x_4 — содержание физической глины на глубине 0—20 см, x_5 — плотность почвы на глубине 0—10 см.

В ходе обработки были получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_{\text{см}} = -66.93 + 0.49x_1 - 0.65x_2 + 5.89x_4 - 147.89x_5 \quad (R = 0.89;\ R^2 = 0.79), \tag{7}$$

$$Y_{\text{дм}} = 145.7 - 1.03x_2 + 1.03x_3 - 96.42x_5 + 0.75x_1 \quad (R = 0.89;\ R^2 = 0.79) \tag{8}$$

$$Y_{\text{м}} = 35.7 - 0.27x_2 - 57.2x_5 + 1.54x_4 + 0.2x_1 \quad (R = 0.65;\ R^2 = 0.42), \tag{9}$$

Рис. 2. Сезонная радиолокационная съемка полигона радиолокатором трехсантиметрового диапазона

Рис. 1. Радиолокационные изображения тестового полигона: *а* — сантиметровом (X), *б* — дециметровом (L) и *в* — метровом диапазонах радиоволн (VHF)

Рис. 3. Совместное радиолокационно-радиометрическое изображение полигона и тематическая карта сельскохозяйственных культур

где $Y_{см}$, $Y_{дм}$, $Y_{м}$ — нормированная РЛ-интенсивность в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах радиоволн соответственно, R — множественный коэффициент корреляции, R^2 — коэффициент детерминации.

Второе направление дешифрирования РЛ-снимков базировалось на использование метода иерархического кластерного анализа. Вычисления проводились по алгоритму Уорда в евклидовом пространстве. В качестве векторов, описывающих многомерное пространство, выступали данные РЛ-съемки в различных диапазонах радиоволн. Дендрограммы представляют собой результат кластерного анализа в виде графического отображения разделения образцов по классам. При этом по горизонтальной оси откладывают номера объектов через равные интервалы, а по вертикальной — значение меры схожести между этими объектами. В качестве меры схожести использован коэффициент слития, показывающий расстояние между классами в заданном многомерном пространстве.

Целью исследований являлось определение вклада показателей состояния «почва—агрофон» в формирование РЛ-сигнала. Для получения качественных результатов на тестовом полигоне отбирались площадки, идентичные по всем характеристикам, кроме изучаемой. Например, при распознавании растительного покрова все исследуемые участки имели сходные почвенные характеристики. В данных условиях четкость разделения объектов по изучаемому признаку позволила говорить как о чувствительности к нему какого-либо радиодиапазона или их комбинаций, так и о степени влияния данного параметра на отраженный радиосигнал.

Для исследования взаимосвязи РЛ-данных с гранулометрическим составом почв были отобраны поля с «легкими почвами» (супесчаные и легкосуглинистые с содержанием физической глины 10—30 %) и «тяжелые» (легкоглинистые и среднеглинистые с содержанием физической глины 60—85 %). На отобранных площадках «легкого» и «тяжелого» гранулометрического состава проводилось машинное разделение по типам агрофонов с использованием кластерного анализа с обучением. В качестве обучающей выборки использовались вышеупомянутые агрофоны полигона и данные сантиметрового диапазона. Для заведомого исключения влияния растительности на отраженный сигнал использовались вспаханные и боронованные поля. В результате была сформирована группа полей, включающих следующие почвы: черноземы оподзоленные на лессах, подстилаемых на глубине 1—2 м песком, и песках «легкого» гранулометрического состава, а также черноземы, оподзоленные на лессовых породах и плотных глинах — «тяжелого» гранулометрического состава.

Обработка данных кластерным анализом показала, что при любой комбинации радиодиапазонов объекты разделяются на два кластера, однако точность классификации зависит от используемых комбинаций.

Наилучшее распознавание происходит при использовании данных сантиметрового и дециметрового диапазонов (рис. 4).

При исследовании растительного покрова оценивались следующие параметры: площадь проективного покрытия растений, их высота и влажность, объемная влажность агрофона. Последний показатель представляет собой комплексную характеристику агрофона, показывающую содержание влаги в квазиобъеме растительного покрова:

$$W_a = W_r/HS, \qquad (10)$$

где: W_a — объемная влажность агрофона, W_r — влажность растительности, H — высота растительности, S — площадь проективного покрытия. Результаты обработки представлены в таблице.

Анализ данных показывает, что наиболее тесная связь наблюдается между отраженными сигналами и показателями агрофона. При этом значения коэффициентов корреляции r между объемной влаж-

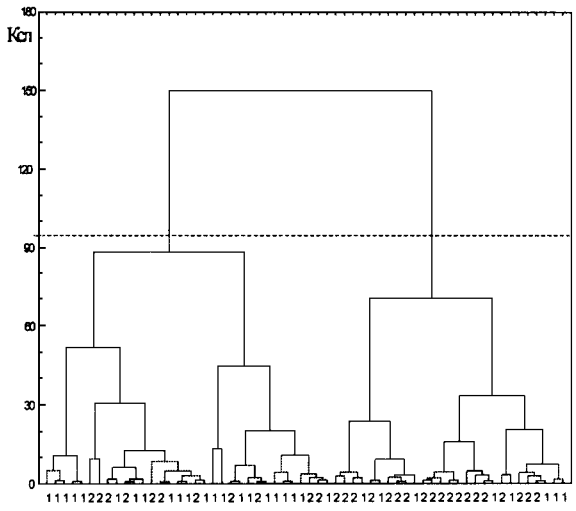


Рис. 4. Распределение грунтов по гранулометрическому составу по данным РЛ-съемки в сантиметровом (3 см), дециметровом (23 см) диапазонах волн: *1* — «легкий» гранулометрический состав, *2* — «тяжелый» гранулометрический состав, пунктир — линия разделения дендрограмы на кластеры

Значения коэффициентов корреляции между данными РЛ-съемки и характеристиками растительности

Показатель	РБО3	РСА23	РСА180
W_a	0.78	0.68	0.40
H	0.20	0.27	0.04
W_r	0.61	0.73	0.57

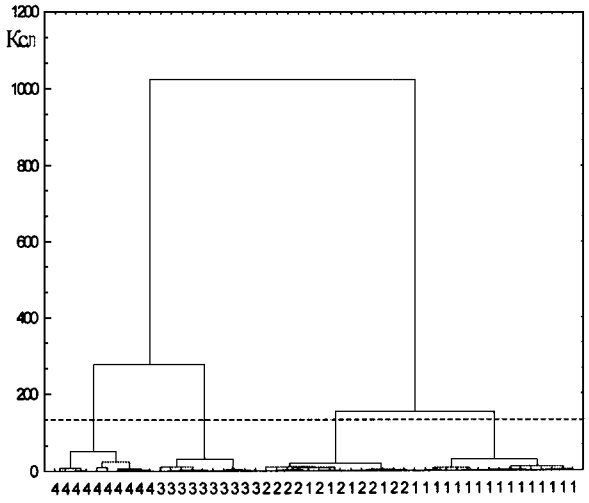


Рис. 5. Распознавание типов агрофонов по данным РЛ-съемки в сантиметровом диапазоне радиоволн (3 см): *1* — стерня зернових культур, *2* — многолетние травы, *3* — кукуруза, *4* — сахарная свекла, пунктир — линия разделения дендрограмы на кластеры

ностью агрофона и данными РЛИ уменьшается с возрастанием длины волны ($r_{см}$ = 0.78, $r_{дм}$ = 0.68, $r_{м}$ = 0.4). Также следует отметить большие значения коэффициента корреляции для содержания влаги в растительности.

Для анализа агрофонов были выбраны две группы: а) пропашные культуры (кукуруза, сахарная свекла), б) культуры сплошного сева (стерня зерновых и многолетние травы).

В первой группе выбраны заведомо контрастные агрофона, во второй — очень схожие.

Наилучшее распознавание агрофонов происходит при использовании данных сантиметрового диапазона. Результаты классификации представлены на дендрограмме (рис. 5) (по оси ординат отложен $K_{сл}$ — коэффициент слития).

Анализ дендрограммы показывает, что происходит четкое разделение агрофонов: кукурузы и сахарной свеклы. Они образуют два непересекающихся кластера. В свою очередь, также четко отделяются от этих агрофонов культуры сплошного сева. Между собой разделение этих культур происходит немного хуже: часть зерновых попадает в кластер «многолетние травы». Это объясняется различным состоянием данных культур (высотой среза стерни и высотой растений многолетних).

В дециметровом и метровом диапазонах радиоволн распознавание типов проективного покрытия происходит значительно хуже ввиду незначительного вклада агрофонов в обратное рассеяние. Комбинированное использование данных нескольких диапазонов не улучшает классификацию.

Наибольшее количество исследований было проведено в сантиметровом диапазоне волн, наиболее чувствительном к обработке пахотного слоя и биометрическим параметрам растительности.

При радиолокационных исследованиях в пределах сельскохозяйственных территорий ранней весной и поздней осенью приходится иметь дело преимущественно с полями, лишенными растительности. Шероховатость таких поверхностей определяется системой обработки пахотного слоя. Типичный сезонный цикл обработки почвы приводит к формированию вспаханных, боронованных, культивированных и засеянных полей, общей отличительной чертой является квазирегулярность поверхностных неровностей (на рис. 2 представлена сезонная съемка полигона, демонстрирующая изменения интенсивности отражения от полей полигона в течение сезона).

По экспериментальным данным было обнаружено, что при больших углах визирования (более 45°) наблюдается линейная зависимость между свойствами растительного покрова (проективное покрытие и высота растений) и интенсивностью отраженного сигнала, причем наиболее тесные связи между этими показателями наблюдаются при исследовании территорий с развитым растительным покровом. Для почвенных характеристик свойственна обратная зависимость — наиболее тесные связи отмечены для площадей со слаборазвитым растительным покровом в углах визирования 30—35°.

Если при радиолокационной съемке направление обработки почвы неизвестно, то возникают неопределенности в трактовке результатов. Пример, иллюстрирующий это, приведен на рис. 6.

Неопределенность из-за неизвестного направления обработки не создает заметных трудностей, так как первоначальная квазирегулярная структура поверхности со временем становится менее выраженной из-за замытости. Зависимость сохраняется, изменяется лишь σ^0.

Радиолокационные изображения сельскохозяйственных площадей ранней весной характеризуются мозаичностью, обусловленной главным образом различиями обработки почвенного покрова, которая, в свою очередь, определяется амплитудой и пространственным периодом поверхностных неровностей.

На рис. 7 приведены экспериментальные угловые зависимости УЭПР для полей с различно обработанным почвенным покровом.

Значения УЭПР в диапазоне углов визирования 25—40° наиболее выровненной поверхности (засеянное поле) падает на 6.5 дБ, тогда как для вспаханных и боронованных полей эта величина не превышает 5 дБ.

Сельскохозяйственные растения, культивирован-

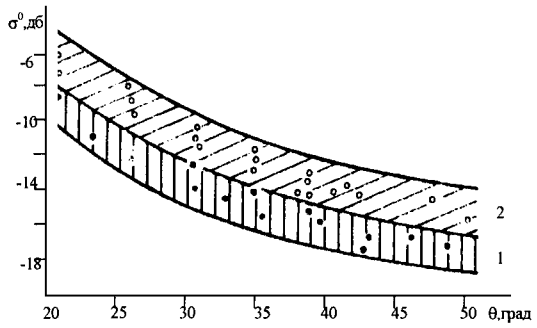


Рис. 6. Экспериментальные угловые зависимости УЭПР для боронованных полей с направлением борозд, параллельным (*1*) и перпендикулярным (*2*) направлением обзора

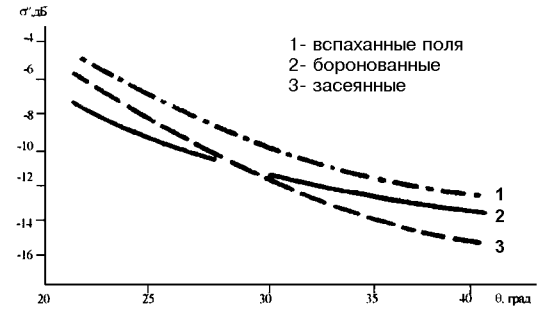


Рис. 7. Экспериментальные угловые зависимости УЭПР для полей с открытым почвенным покровом (направление обзора перпендикулярно бороздам обработки: *1* — вспаханные, *2* — боронованные, *3* — засеянные поля

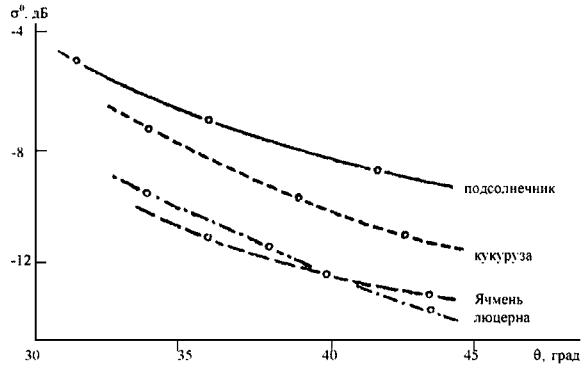


Рис. 8. Экспериментальные угловые зависимости σ^0 сельскохозяйственных растений

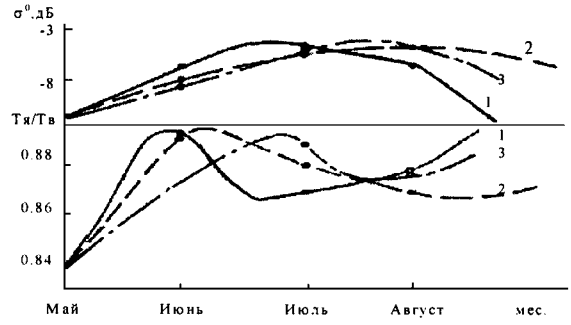


Рис. 9. Зависимость УЭПР от стадий вегетации ($\theta = 30°$)

ные на полигоне дистанционного зондирования, ограничены несколькими видами — кукуруза, ячмень, многолетние кормовые травы, подсолнечник. На рис. 8 приведены экспериментальные угловые зависимости УЭПР для этих культур по результатам радиолокационной съемки, проведенной в первой декаде июля.

Этот период интересен тем, что к концу июня — началу июля растения достигают зрелых стадий вегетации. Подсолнечники и кукуруза обладают наиболее высоким отражением, что обусловлено особенностями ориентации листьев и соцветий этих культур, а также большей, по сравнению с зерновыми, биомассой. Посевы многолетников и ячменя имеют сходные УЭПР, можно лишь отметить чуть более пологий график угловой зависимости для ячменя.

Как показали исследования, сезонный цикл каждой из культур характеризуется тремя основными фазами. Первая фаза — прорастание и развитие посевов, приводит к постепенному росту значений УЭПР. В определенный для каждой культуры период времени значения УЭПР стабилизируются. Это означает переход ко второй фазе, отвечающей зрелой стадии культуры с относительно постоянными биомассой и влагосодержанием. Третья фаза отвечает заключительной стадии вегетации — растение резко теряет влагу, часть листьев; УЭПР заметно уменьшается. Эти фазы можно видеть на рис. 9, где в качестве примера рассматриваются посевы подсолнечника (*1*), свеклы (*2*), кукурузы (*3*).

При интерпретации РЛ данных нередко возникали неоднозначности в идентификации типов культур (РБО-3 см). Использование в комплексе системы датчиков радиолокатор-радиометр (РМ-08 см) позволило достаточно уверенно различать типы культур (рис. 3).

Результаты экспериментальной классификации приведены на рис. 10. По оси y отложены данные радиолокатора σ^0, а по оси x — данные радиометра, характеризующиеся коэффициентом черноты (отношение радиояркостной и физической температур подстилающей поверхности).

В случае с подсолнечником наблюдается азимутальная неоднозначность в интерпретации типа культуры, как радиолокатором, так и радиометром. Данная культура уверенно распознается в двух областях (рис. 10) при использовании обоих приборов одновременно. Разница в отражении и излучении заключается в ориентации головок подсолнеч-

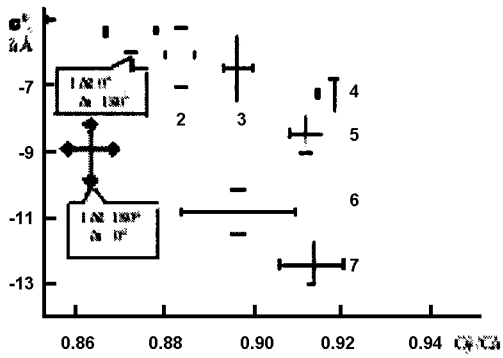


Рис. 10. Распознавание типов сельскохозяйственных культур по данным РБО-3 см и РМ-08 см (θ = 40°): *1* —подсолнечник, *2* — свекла, *3* — кукуруза, *4* —ячмень, *5* — овес, *6* — люцерна, *7* — пашня

ника относительно курса самолета-лаборатории. В данном случае солнце находилось на востоке, и в одном случае его излучение, а соответственно и направленность головок, совпадали с направлением излучения радиолокатора и приема радиометра, а в другом — нет.

Данные радиометра (рис. 9, нижний) также позволяют проследить сезонные изменения коэффициента черноты для посевов подсолнечника, кукурузы и свеклы. Рост Тя/Тв на начальной стадии развития растений связан с существенным влиянием излучения почвы и прекращается в момент полного экранирования почвы растительностью. Различие фенологических фаз развития различных видов растительности позволяют при длительном наблюдении обеспечивать правильную классификацию посевов. В то же время сезонные наблюдения позволяют определять степень созревания посевов, сроки их уборки, а сравнительные характеристики различных сезонов дают возможность прогнозировать урожайность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически показано, что многочастотные синхронные подходы позволяют успешно проводить исследование параметров почв и растительного покрова. Наличие взаимосвязи между радиолокационными и агрофизическими характеристиками подтверждено экспериментально. В частности, применение длинноволновых датчиков наиболее характерно для описания почвенных характеристик, таких как влажность, плотность, гранулометрический состав. Коротковолновые датчики наиболее информативны для описания параметров растительного покрова, таких как влажность, высота, проективное покрытие и др.

Исследования, представленные в публикации, выполнены при частичной поддержке ДФФД Украины по планам работы по проекту № Ф7/354-2001.

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М., 1972.—424 с.
2. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. — М.: Мир, 1981.—Т. 2.—317 с.
3. Калмыков А. И., Фукс И. М. Модели рассеяния радиоволн подстилающей поверхностью и их учет в системах радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия.—1996.—**1**, № 1.—С. 31—41.
4. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Курекин А. С. и др. Многоцелевой радиолокационный комплекс исследования Земли «МАРС» // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—**3**, № 2.—С. 119—129.
5. Калмыков А. И., Щербинин И. В., Яцевич С. Е. Комплексные радиофизические исследования сельскохозяйственных угодий // Космическая наука и техника: Сб. науч. тр. / АН УССР. — Киев: Наук. думка, 1990.—С. 32—36.
6. Яцевич С. Е., Курекин А. С., Уваров В. Н., Левда А. С. Автоматическая внутренняя калибровка радиолокационных систем дистанционного зондирования // Космічна наука і технология.—1998.—**4**, № 2/3.—С. 34—39.
7. Attema E. P., Ulaby F. T. Vegetation modeled as a water cloud // Radio Science.—1978.—N 13(2).—P. 357—364.
8. El-Rayes M. A., Ulaby F. T. Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation. Part 1: Experimental Observations // IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.—1987.—**25**, N 5.—P. 541—557.
9. Hoekman D. H., Krul L., Attema E. P. W. A multilayer model for radar backscattering from vegetation canopies // Digest, II Annual Int. G.S & R. S. Symp. — Munich, 1982.—Vol. II.—P. 4.1—4.7.
10. Kulemin G. R., Shcherbinin I. V., Yatsevich S. E., et. al. Physical Principles of Microwave Remote Sensing of Terrains // Proc. of the 6th physics international school «Microwave physics and technique», 2—7 Oct. 1989. — Varna (Bulgaria): Utopia Press, 1989.—P. 16—33.
11. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave remote sensing: active and passive. — Addison-Wesley Publ. Company Inc., Reading, MA, 1982.—Vol. II.—607 p.
12. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, From Theory to Applications. — Dedham, MA: Artech House, 1986.—2162 p.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 271—275

Аппаратура и методы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне

С. М. Кочубей

Институт физиологии растений и генетики НАН Украины, Киев

Дистанционное зондирование раститель-ности в оптическом диапазоне основывается на характерном виде спектра отражения, что определяет богатые информационные возможности такого подхода. Из показанного на рис. 1 спектра зеленого листа видно, что характерными областями являются широкий максимум в зеленой области, минимум в красной области и резкое нарастание интенсивности от красного минимума до плато в ближней инфракрасной области. Эта область подъема называется красным краем спектра отражения растительности и служит тестовым признаком для ее обнаружения, например при наблюдениях поверхности Земли из космоса.

Специфическая форма спектров отражения растительности в оптическом диапазоне обусловлена спектральными характеристиками зеленого пигмента листьев хлорофилла. Поэтому такие спектры могут быть использованы как источник информации для дистанционного определения содержания пигмента. Это показатель важен для детекции состояния растительности. Известно, например, что содержание хлорофилла в листьях может быть показателем потенциальной мощности фотосинтетического аппарата и использоваться для прогнозных оценок урожая. Экологические стрессы различных типов прежде всего влияют на фотосинтетический аппарат, индуцируя вариации содержания хлорофилла. Сезонные изменения этого показателя дают важную информацию о ходе вегетации в том или ином растительном сообществе. Например, измерения так называемых кривых «зелености», т. е. зависимости содержания хлорофилла в течение вегетационного сезона на тех или иных участках земной поверхности, позволяют классифицировать тип растительности. Для посевов сельскохозяйственных культур по таким данным можно оценить сроки созревания.

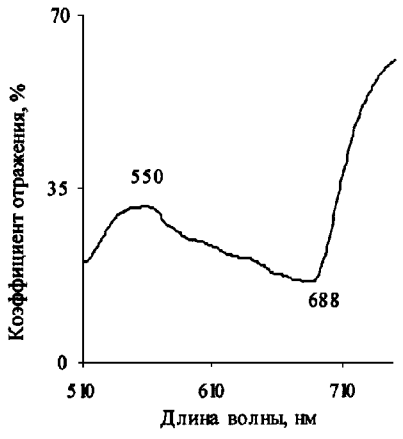


Рис. 1. Спектр отражения зеленого листа

Задача определения биохимических компонентов листьев по спектральным характеристикам отражения является привлекательной для самых различных аспектов получения экспресс-информации о состоянии растений. Очевидно, поэтому поиски надежных тестовых характеристик интенсивно ведутся в различных лабораториях мира. Использование наряду с видимой областью спектра и ближней инфракрасной позволило разработать показатели для определения содержания лигнина, белка, крахмала, общего азота [1—3]. Водный статус листьев тестировали по спектральным данным в работах [4—8]. Данные по определению хлорофилла приведены в ряде исследований [9—13], оценки содержания каротиноидов проводили в работах [14—16]. Спектральные коэффициенты яркости применялись также для тестирования стрессов растительности и оценок фотосинтеза [17, 18]. В большинстве случаев для этого находили математические комбинации спектральных коэффициентов яркости, которые коррелировали с содержанием того или иного биохимического компонента. Полученные линейные регрессии между указанными параметрами давали хорошую статистическую достоверность результатов, но только для лабораторных измерений.

© С. М. КОЧУБЕЙ, 2002

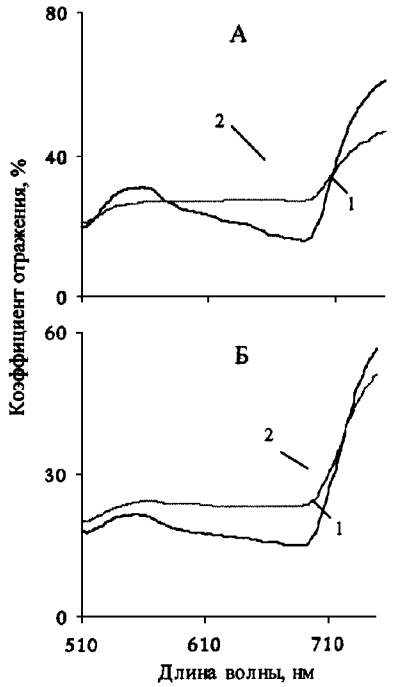


Рис. 2. Спектры отражения листьев с низким (2 мг/дм^2 (А) и высоким (5 мг/дм^2 (Б) содержанием хлорофилла на фоне светлой почвы. Кривые *1* и *2* — 100 и 50 % проективного покрытия соответственно

При проведении дистанционных измерений в полевых условиях, с борта самолета или космического корабля корреляция между спектральными параметрами и биохимическими показателями ухудшается или полностью разрушается [1, 6]. Одной из основных причин является суперпозиция потоков света, отраженных от растительности и подстилающей поверхности, почвы, которая значительно искажает спектр отражения растительности. Величина искажений различна в различных областях спектра и зависит от соотношения полезного и искажающего сигналов. На рис. 2 показаны спектры отражения листьев с различным содержанием хлорофилла на фоне почвы с различным отражением при различном проективном покрытии. Видно, что наибольшие искажения, в особенности формы красного края, наблюдаются при низком содержании хлорофилла и высоких показателях отражения почвы.

Уменьшить влияние вклада отражения почвы на величину полезного сигнала пытаются путем разработки более сложных индексов, в том числе включающих отражение в инфракрасной области спектра [19, 20] Эти индексы оказались чувствительными к помехам, создаваемым пропусканием атмосферы, поэтому предлагались еще более сложные выражения для поправок на этот фактор [21] Однако до сих пор не проведены количественные оценки снижения уровня влияния искажающих помех. Кроме того, эти подходы представляются мало эффективными для широкого практического применения по ряду причин. Так, использование ИК-области для получения внутреннего репера оценки вклада почвы нецелесообразно, так как для растительности характерны высокие коэффициенты отражения в этой области. Наблюдения динамики отражательных характеристик ценоза требует больших затрат времени и позволяет провести оценку измеряемых величин только в конце вегетации. Возможны также и помехи, обусловленные изменениями отражательных характеристик почвы во времени.

Более корректные результаты по отделению вклада отражения почвы от полезного сигнала могли бы дать непосредственные измерения коэффициентов яркости почвы, на которой произрастает данное растительное сообщество. При этом измерения должны проводиться в то же время, что и растительности. Разнесение измерений во времени может вызвать большие искажения результатов, поскольку величина и спектральное распределение отражения от почвы существенно зависят от степени ее увлажненности и поверхностной структуры. Использование формул определения биохимических компонентов через спектральные коэффициенты яркости практически неприемлемо для аэрокосмических измерений в связи с большими трудностями проведения корректных измерений эталонных поверхностей, необходимыми для вычисления указанных спектральных характеристик. Эти причины, очевидно, являются основными факторами, разрушающими корреляции, полученные при лабораторных измерениях в случае применения их в полевых условиях.

Альтернативу указанному подходу дают методы, базирующиеся на спектральных измерениях с высоким разрешением по спектру. Исследования с применением такой техники с борта самолета начались с 80-х годов прошлого столетия. Основное внимание уделялось характеристикам красного края спектра отражения. Уже в ранних работах отмечалось, что положение красного края зависит от содержания хлорофилла [22, 23]. Указывалось, что информация, содержащаяся в этой области спектра достаточна для детекции небольших различий в химическом и морфологическом состоянии растений [24]. Отмечалась чувствительность параметров красного края к стрессу [25]. Установлена корреляция различных параметров красного края с содержанием хлорофилла в листьях сахарной свеклы [26]. В отделе биохимии фотосинтеза Института физиологии растений и генетики с середины 80-х годов был проведен обстоятельный цикл исследова-

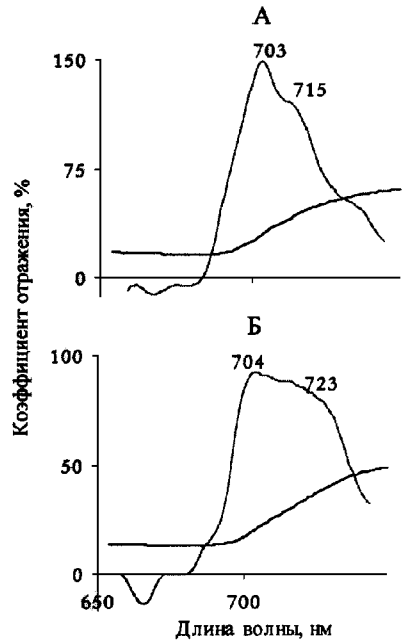


Рис. 3. Спектры отражения листьев с низким (2 мг/дм^2 (А) и высоким (5 мг/дм^2 (Б) содержанием хлорофилла и графики 1-й производной

ний, связанный с разработкой методов тестирования состояния растений с использованием спектроскопии высокого разрешения. В частности, были разработаны методы определения концентрации содержания хлорофилла и общего азота в листьях, обоснованы подходы к определению таких показателей как проективное покрытие и сроки созревания [13]. Позднее была показана возможность прогноза урожая озимой пшеницы [27] Основным информативным параметром в наших подходах служило отношение максимумов в графике первой производной от спектральной кривой отражения в области красного края.

На рис. 3 показаны спектры отражения листьев с различным содержанием хлорофилла и графики первой производной. Видно, как изменяется форма красного края и насколько выразительны эти отличия в графиках первой производной. Отношение максимумов первой производной является количественной характеристикой формы спектральной кривой в указанной области.

В силу этого оказалось возможным связать его регрессионным отношением с содержанием хлорофилла и общего азота. Нами впервые было указано на повышенную устойчивость указанного параметра формы спектра отражения к помехам, обусловленным отражением подстилающей поверхности и влиянию пропускания атмосферы [13]. Основной причиной является то обстоятельство, что спектральное распределение отражения от почвы является медленно изменяющейся функцией, в то время как скорость изменения этой величины в области красного края во много раз больше даже для случаев низкого содержания пигмента в листьях. Применяемая нами процедура вычисления первой производной с помощью аппроксимации экспериментальной кривой полиномами второй степени равносильна применению числового фильтра, который эффективно отсекает низкочастотную часть, обусловленную слабо изменяющимся спектральным распределением отражения почвы. Исследование, проведенное на экспериментальных имитационных моделях, показало, что даже в наихудшем варианте — низкое содержание хлорофилла (около 2 мг/дм^2) на фоне светлой почвы (отражение при 700 нм около 20 %) отклонение от значения содержания хлорофилла, определенного химическим способом, не превышает 30 % [28]. Для аналогичного определения с помощью формулы, использующей коэффициенты яркости, соответствующие значения отличаются в три раза.

Недостатком описываемого метода является его чувствительность к таким параметрам, как спектральное разрешение и уровень инструментальных шумов. Первая из этих причин влияет на положение максимумов в графике первой производной и их разрешение по спектру. Вторая — на относительную интенсивность максимумов. Искажающее влияние возрастает по мере снижения уровня информативного сигнала. Так, по мере уменьшения содержания хлорофилла уменьшается крутизна спектральной кривой в области красного края, при этом влияние шумового компонента возрастает. На рис. 4 приведены графики 1-й производной от спектральных кривых отражения листьев с различным содержанием хлорофилла, построенных для уровней шума 5 и 20 %. Отношения максимумов для кривых с большим и меньшим уровнями шумов отличаются в 1.5 раза для варианта с более низким содержанием пигмента. Величина этого отношения снижается до 1.25 при более высоком содержании хлорофилла. Такой результат получен с применением двойной процедуры сглаживания — сплайнами по 11 точкам, и при аппроксимации полиномами 2-й степени по 11 точкам. Следует отметить, что в данном случае изменение уровня шума в 4 раза вызвало изменение величины параметра, используемого для расчета содержания хлорофилла, в 1.5 и 1.25 раза. Такой результат получен благодаря тому, что высокое спектральное разрешение, 1 нм, дает достаточную информацию для проведения высокого уровня усреднения данных. Следует отметить, что для приведенного примера, соответствующего высокой степени сглаживания шумов, расчетное значение содержания хлорофилла отличается

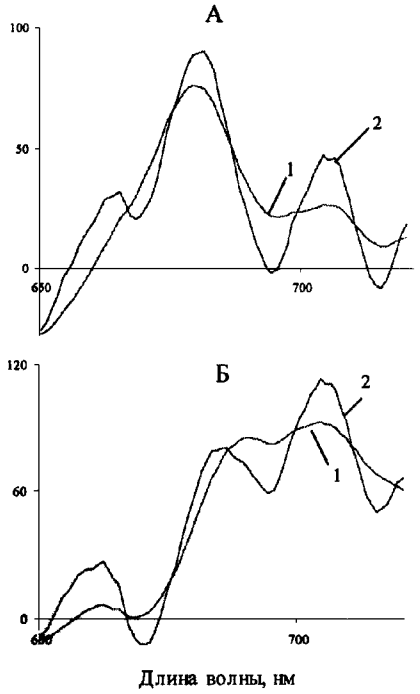


Рис. 4. Графики 1-й производной от спектральных кривых отражения листьев с низким (2 мг/дм^2 (А) и высоким (5 мг/дм^2 (Б) содержанием хлорофилла. Кривые *1* и *2* — уровень шума в записи 5 и 20 % соответственно

на 50 и 25 % при использовании спектрограмм с разным уровнем шума.

Рассмотренное выше влияние инструментальных параметров на точность вычисления содержания хлорофилла показывает, что при конструировании приборов для реализации метода необходимо провести оптимизацию указанных параметров, исходя из конкретных условий измерения и существующей элементной базы. Прежде всего критичным оказывается расстояние, на котором предполагается проводить измерения. Если оно порядка размеров площадки, с которой желательно получить информацию, то возникают значительные трудности как с формированием изображения измеряемой площадки в области фотоприемника, так и в связи с уменьшением светового потока, поступающего в прибор, что обусловливает понижение уровня полезного сигнала. Такие проблемы возникают, в частности, при конструировании приборов для полевых исследований в наземных условиях. Например, проведенные расчеты показывают, что использовавшийся в работах отдела биохимии фотосинтеза Института физиологии растении и генетики НАН Украины оптический блок бортового спектрометра при измерениях с расстояния 1.5 м захватывает световой поток с площадки размером 1 м×3 м. При этом электрический сигнал от попадающего в прибор светового потока в минимуме спектра отражения при разрешении 1 нм и освещенности объекта порядка 50 000 люкс только в 10 раз превышает уровень шума фотоумножителя типа ФЭУ-84. Понятно, что возникает проблема как с формированием более приемлемого поля изображения, так и улучшением энергетических параметров.

Проведенный нами предварительный анализ показывает, что приборная реализация разработанного нами подхода для дистанционного измерения содержания хлорофилла в растительности требует разработки теоретической базы, которая бы формулировала принципы оптимизации как алгоритма вычисления, так и параметров спектрального прибора.

1. Peterson D. L., Aber J. D., Matson P. A., et al. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents // Remote Sens. Environ.—1988.—**24**.—P. 85—108.
2. Bo-Cai Gao and Goetz A. F. H. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopy from AVIRIS data // Remote Sens. Environ.—1995.—**52**.—P. 155—162.
3. Wessman C. A., AberJ. D., Peterson D. L., Melillo J. M. Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems // Nature.—1988.—**335**, N 9.—P. 154—156.
4. Riggs G. A., Running S. W. Detection of canopy water stress in conifers using the airborne imaging spectrometer // Remote Sens. Environ.—1991.—**35**.—P. 51—68.
5. Penuelas J., Fiella I., Biel C., et al. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status // Int. J. Remote Sens.—1993.—**14**.—P. 1887—1905.
6. Bostater C., Rebbman J. Temporal measurement and analysis of high resolution spectral signatures of plants and relationships to biophysical characteristics // Proc. Int. Symp. Remote Sensing for Agriculture, Forestry, and Natural Resources, 26—28 September 1995, Paris France.
7. Bowman W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange and spectral reflectance in cotton leaves // Remote Sens. Environ.—1989.—**30**.—P. 249—255.
8. Shibayama M., Takahashi W., Morinaga S., Akyama T. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectrometer // Remote Sens. Environ.—1993.—**45**.—P. 117—126.
9. Кондратьев К. Я., Федченко П. П., Бармина Ю. М. Опыт определения содержания хлорофилла в листьях растений по цветовым координатам // Докл. АН СССР.—1982.—**262**, № 4.—С. 1022—1024.
10. Сидько А. Ф., Шевырногов А. П. Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // Исслед. Земли из космоса.—1998.—№ 3.—С. 96—105.
11. Campbell J. W., Esalas W. E. Basis for spectral curvature algorithms in remote sensing of chlorophyll // Appl. Opt.—1983.—**22**, N 7.—P. 1084—1090.
12. Milton N. M., Monat D. A. Remote sensing of vegetation responses to natural and cultural environment condition // Photogram. Eng. And Remote Sens.—1989.—**55**.—P. 1167—1173.
13. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной

диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
14. Gitelson A. A., Merzlyak M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum L.* and *Acer Platanoides L.* leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation // J. Plant Physiol.—1994.—**143**.—P. 286—292.
15. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chircunova O. B., Rakitin V.Yu. Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening // Physiol. Plant.—199.—**106**.—P. 136—141.235
16. Penuelas J., Baret F., Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll {a }ratio from leaf spectral reflection // Photosynthetica.—1995.—**31**.—P. 221—230.
17. Carter G. A., Cibula W. G., Miller R. L. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress // J. Plant Physiol.—1996.—**148**.—P. 515—520,
18. Carter G. A. Reflectance wavebands and indices for remote estimation of photosynthesis and stomatal conductance in pine canopies // Remote Sens. Environ.—1998.—**63**.—P. 61—72.
19. Qi J., Huete A. R., Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) // Remote Sens. Environ.—1994.—**48**.—P. 119—126.
20. Чимитдоржиев Т. Н., Ефременко В. В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // Исслед. Земли из космоса.—1998.—№ 3.—С. 49—56.
21. Huete A. R., Liu H. Q. An error and sensitivity analysis of the atmospheric and soil correcting variant of the NDVI for the MODIS-EOS // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.—1995.—**32**, N 4.—P. 897—905.
22. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflection // Int. J. Remote Sens.—1983.—**4**, N 2.—P. 273—288.
23. Ferns D. C., Zara S. J., Barber J. Application of high resolution spectroradiomertry to vegetation // Photogram. Eng. And Remote Sens.—1984.—**50**, N 12.—P. 1725—1739.
24. Boochs F., Kupfer G., Dockter K., Kьhbauch W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants // Int. J. Remote Sens.—1990.—**10**.—P. 1741—1753.
25. Buschmann C., Rinderle U., Lichtenthaler H. K. Detection of stress in coniferous forest trees with the VIRAF Spectrometer // IEEE Trans. Geosi. Remote Sens.—1991.—**29**, N 1.—P. 96—100.
26. Vogelmann J. E., Rock B. N., Moss D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves // Int. J. Remote Sens.—1993.—**14**, N 8.—P. 1563—1575.
27. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ, Український фітосоціологічний центр, 2001.—219 с.
28. Кочубей С. М. Сравнение информативных возможностей многозональной съемки и спектроскопии высокой разрешающей способности при дистанционном зондировании растительного покрова // Космічна наука і технологія.—1999.—**5**, № 2/3.—С. 41—48.

Вирішення тематичних задач радіофізичними методами

Результаты многочастотного радиолокационного мониторинга неоднородностей волнения морской поверхности

М. В. Белоброва[1], А. Г. Боев[2], В. К. Иванов[1], И. А. Калмыков[3], А. Я. Матвеев[3], В. Б. Разсказовский[3], В. Н. Цымбал[3]

[1]Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков

[2]Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков

[3]Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков

Дистанционные исследования неоднородностей морской поверхности решают задачи оперативного контроля экологии окружающей среды (обнаружение загрязнений на морской поверхности поверхностно-активными веществами), важны для обеспечения безопасности судоходства в акваториях мощных течений и в зонах проявления внутренних волн, необходимы для коррекции прогнозов погоды для близлежащих к течениям прибрежных районов и др. Для решения таких многопараметрических задач все чаще используются многочастотные радиолокационные методы, как наиболее информативные и наименее подверженные влиянию погодных условий и условий освещенности. В данной работе исследования неоднородностей морской поверхности были выполнены с помощью комплекса МАРС [5], в состав которого входят два радиолокатора бокового обзора ($\lambda_1 \approx 0.8$ см, $\lambda_2 \approx 3$ см) с реальной апертурой РБО и два радиолокатора с синтезированной апертурой РСА ($\lambda_3 \approx 23$ см, $\lambda_4 \approx 180$ см).

© М. В. БЕЛОБРОВА, А. Г. БОЕВ, В. К. ИВАНОВ, И. А. КАЛМЫКОВ, А. Я. МАТВЕЕВ, В. Б. РАЗСКАЗОВСКИЙ, В. Н. ЦЫМБАЛ, 2002

Все радиолокаторы комплекса имеют примерно одинаковое пространственное разрешение 20...50 м, одинаковые средние излучаемые мощности 10...12 Вт, совмещенные полосы обзора шириной 30...50 км и обработку принятой информации в реальном времени.

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ВЫЗВАННЫХ РАЗЛИВОМ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Важными для понимания процессов гашения поверхностных волн пленками поверхностно-активных веществ были результаты многочастотного зондирования 14.08.90 участка Черноморского побережья Крымского полуострова (вблизи г. Орджоникидзе). На рис. 1 приведены синхронные изображения, полученные в сантиметровом (слева) и дециметровом (справа) диапазонах длин радиоволн. Состояние морской поверхности в момент измерений контролировалось по данным ближайших к месту наблюдений метеостанций. Скорость приводного ветра составляла 3—5 м/с, что совпадает с оценками скорости ветра по величине удельной эффективной поверхности рассеяния σ° в сантиметровом диапазоне длин радиоволн ($\sigma_{\text{моря}}{}^\circ \approx -26$ дБ при $\Theta = 65°$). В отличие от обычно наблюдаемых проявлений разливов поверхностно-активных веществ одновременно в изображениях сантиметрового и дециметрового диапазонов длин радиоволн, в данном эксперименте только в дециметровом изображении с высоким радиолокационным контрастом $D_{\max} \approx$ $\approx$ 19 дБ видна струя вытекающей с берега в море жидкости. Одним из возможных объяснений такого эффекта является влияние толщины пленки поверхностно-активного вещества ПАВ, активно гасящей более короткие поверхностные волны. В работе [4] отмечалось, что это возможно, если толщина пленки h становится сравнимой с глубиной затухания вязкой волны δ в пленке:

$$\delta \approx \sqrt{2\nu_1/\omega},$$

где ν_1 — коэффициент кинематической вязкости, omega — частота поверхностной волны. Оценки показывают, что при $h/\delta \geq 0.1$ пленка будет оказывать все возрастающее влияние на радиолокационный контраст более коротких длин волн. При этом с уменьшением длины поверхностной волны в пленке растет величина слоя δ, препятствующего передаче колебаний морской поверхности пленке. Это, в свою очередь, уменьшает реакцию пленки на колебания поверхности и снижает контраст между чистой и загрязненной поверхностью. Для нефтяной пленки толщиной $h = 0.03$ мм характерные значения $\nu_1 \approx 0.08...0.3$ см^2/с [3]. При этом для угла наблюдения $\Theta = 60°$ на длинах радиоволн $\lambda_1 = 3$ см и $\lambda_2 = 23$ см отношение $(h/\delta)_1 = 0.11...0.21$ и $(h/\delta)_2 = 0.06...0.1$ соответственно. Из приведенных оценок можно сделать вывод, что наблюдаемые в эксперименте различия в радиолокационных контрастах изображений сантиметрового и дециметрового диапазонов длин радиоволн могут быть достигнуты только при больших значениях h/δ, т. е. при большой толщине пленки, появляющейся, например, на начальной стадии растекания нефти (или нефтепродуктов) по морской поверхности. Кроме того, на поверхности толстой пленки под действием ветрового возмущения могут возникать собственные колебания, что также способствует уменьшению контраста между чистой и загрязненной поверхностями. Поэтому в подобных случаях мониторинг в наиболее чувствительном к морскому волнению сантиметровом диапазоне может быть малоэффективным и только многочастотное зондирование позволяет устранить этот недостаток.

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МОРСКИХ ТЕЧЕНИЯХ

При мониторинге акватории Баренцева и Карского морей течение Гольфстрим часто регистрировалось с более высоким положительным контрастом радиолокаторами дециметрового и метрового диапазонов длин волн. Отсутствие соответствующего контраста в наиболее чувствительном к состоянию морской поверхности сантиметровом диапазоне указывает на существование в акватории течения других (кроме ветровых) мощных механизмов генерации колебаний морской поверхности. Для анализа на рис. 2 приведены дециметровое и метровое изображения участка течения Гольфстрим в Баренцевом море (71°32′ N, 22°34′ E, 05.08.93) и интерпретационная карта, построенная по данным съемки. Видно, что неоднородности с масштабами, соответствующие рассеянию радиоволн дециметрового диапазона, наблюдаются с примерно одинаковым контрастом ($D_{\max} \approx 14.9$ дБ) на всей поверхности течения и на некотором удалении от границ. Неоднородности, соответствующие рассеянию радиоволн метрового диапазона, наблюдаются с меньшим контрастом ($D_{\max} \approx 6.4$ дБ) преимущественно внутри основного потока течения, концентрируясь вблизи границ. Для оценки размеров наблюдаемых неоднородностей в этих зонах был проведен анализ пространственных энергетических спектров и автокорреляционных функций [2]. На рис. 3 приведены результаты оценок спектральной плотности мощности $S_{xx}(a)$ и автокорреляционной функции $R(x)$ в верхней I и нижней II части приграничной зоны

Рис. 1. Синхронные изображения Черноморского побережья, полученные с помощью комплекса МАРС в дм- и см-диапазонах (слева и справа)

Рис. 2. Синхронные изображения в дм- и метровом диапазонах участка течения Гольфстрим в Баренцевом море и интерпретационная карта

Рис. 3. Спектральная плотность мощности и АКФ по данным зондирования течения в метровом диапазоне

Рис. 4. Синхронные изображения неоднородностей морского волнения, полученные с помощью комплекса МАРС по результатам зондирования в см-, дм- и метровом диапазонах длин радиоволн

течения по данным зондирования в метровом диапазоне. Вид S_{xx} и $R(x)$, а также отсутствие контраста в изображениях сантиметрового диапазона (что соответствует скорости приповерхностного ветра менее 3—5 м/с), позволяют предположить, что неровности поверхности, резонансно рассеивающие метровые радиоволны, принадлежат к возмущениям неветрового происхождения, которые содержат как резонансно рассеивающие компоненты, так и крупномасштабные (до 1000 м и более).

Наличие таких крупномасштабных неоднородностей в акватории течения указывает на то, что в период наблюдения одним из наиболее вероятных механизмов формирования спектра поверхностных колебаний являлись процессы, порожденные турбулентностью движущегося струйного потока. Необходимо подчеркнуть, что именно наблюдения с применением РСА метрового диапазона длин радиоволн дают возможность исследовать явления в наиболее динамичных приграничных зонах течения. При этом более информативными могут быть данные одновременного многочастотного зондирования, так как, например, при отсутствии ветра и наличии крупных волн радиолокаторы сантиметрового диапазона длин радиоволн могут давать слабоконтрастные изображения. Это приводит к различиям в оценке размеров и даже местоположения русла течения.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Проявление внутренних волн было обнаружено радиолокаторами комплекса МАРС в Баренцевом море вблизи северной части острова Новая Земля (77°15′ N, 64°40′ E). Возможность образования внутренних волн в районе наблюдений подтверждается гидрологическими данными: глубина не более 200 м, течение (Западно-Новоземельное) со скоростью около 25 см/с, рельеф дна равнинный с мелкохолмистым и мелкоглыбовым расчленением. На рис. 4 приведены синхронные изображения неоднородностей морского волнения, полученные по результатам зондирования в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн. Их анализ показывает, что с максимальным (по абсолютной величине) контрастом ($|D|$ = 11... 16 дБ) внутренние волны наблюдаются только в L-изображении. При этом волны имеют квазипериодическую структуру с периодом около 3 км. Слабый контраст верхней части изображения сантиметрового диапазона свидетельствует о незначительном морском волнении в момент проведения эксперимента. Увидеть проявление внутренних волн на поверхности при зондировании в этом диапазоне удалось только после выключения временной автоматической регулировки усиления ВАРУ приемника (нижняя часть изображения), что увеличило потенциал радиолокатора в ближней части полосы обзора на 12 дБ. Несмотря на слабый контраст внутренних волн ($|D|$ = 2.5 ... 5.4 дБ) в изображении метрового диапазона, данные одновременного зондирования в дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн несут информацию о энергонесущей части спектра морского волнения. Одним из возможных механизмов наблюдаемого проявления внутренних волн могут быть особенности динамики приповерхностного слоя в поле обрушения ветровых волн, которые приводят к подавлению волнения в областях дивергенции течения [1]. Очевидно, что при достаточном ветровом волнении проявление внутренних волн можно будет наблюдать и с помощью радиолокатора сантиметрового диапазона. Поэтому наиболее информативным для наблюдения проявлений внутренних волн на морской поверхности является синхронный мониторинг в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн.

Таким образом, приведенные результаты исследований, выполненных с помощью авиационного радиолокационного комплекса МАРС, подтверждают максимальную информативность одновременного радиолокационного зондирования в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах трех основных типов неоднородностей морской поверхности.

1. Дулов А. В., Запевалов А. С., Большаков А. Н., Смолов В. Е. Проявление динамики воды в прибрежной зоне в поле обрушений ветровых волн // Морской гидрофиз. журн.—1999.—№ 4.—С. 3—17.
2. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.—482 с.
3. Субботина Е. П. Сборник физических констант и параметров. — Л: Изд-во ЛГУ, 1967.—148 с.
4. Boyev A. G., Karvitsky G. E., Matveyev A. Ya. Tsymbal V. N. Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Date // Telecommunications and Radio Engineering.—1997.—**51**, N 8.—P. 4—12.
5. Kalmykov A. I., Tsymbal V. N., Matveev A. Ya., et al. The Two-Frequency Multipolarisation L/VHF Airborne SAR for Subsurface Sensing // AEU Internat. J. Electronics and Communications. Archiv für Electronik und Übertragungstechnik.—1996.—**50**, N 2.—P. 145—149.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 279—286

Применение сигналов с фазовой манипуляцией для расширения полосы обзора космических радиолокаторов дистанционного зондирования Земли с синтезированием апертуры антенны

Б. Г. Тысик, А. С. Курекин, В. Б. Ефимов, А. С. Гавриленко, И. А. Калмыков, В. Н. Цымбал

Центр радиофизического зондирования Земли НАН и НКА Украины, Харьков

Классические космические радиолокаторы бокового обзора с синтезированием апертуры (РСА) вследствие высокой скорости носителя имеют ограниченную полосу обзора, не превышающую 100 км. Вместе с тем для решения многих задач дистанционного зондирования природной среды Земли требуется гораздо более широкая полоса наблюдения.

Способами расширения полосы обзора является применение сканирующих в угломестной плоскости антенн, либо антенн с веерной диаграммой направленности. В этом случае удается получать полосы захвата до 700 км при парциальной полосе обзора не более 100 км, т. е. рабочая полоса обзора остается по-прежнему ограниченной. При этом, существенным образом усложняется антенная система РСА и возрастает его стоимость.

В данной работе рассмотрен вопрос расширения полосы обзора РСА путем использования специального вида наборов зондирующих сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией теми или иными дискретными кодовыми последовательностями (КФМ-сигналов). Предлагается применение периодически повторяющихся пачек импульсов, состоящих из 3 — 4 импульсов с высокими уровнями коэффициентов сжатия и взаимной развязки, что позволяет реализовать полосу обзора 300 км и более без ухудшения разрешающей способности системы. При этом однозначность по азимуту обеспечивается частотой повторения импульсов, а однозначность по дальности — частотой повторения пачек последовательностей.

Коды предлагаемых КФМ-сигналов выбирались из бинарных псевдослучайных М-последовательностей [2], что позволяет, как будет показано ниже, оптимально решить задачу расширения полосы обзора РСА.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

Построим математическую модель, описывающую формирование отраженного сигнала в условиях, когда зондирующие импульсы различны от импульса к импульсу и полосы обзора взаимно перекрываются. Пусть радиолокатор, осуществляющий боковой обзор плоской земной поверхности, установлен на носителе, который перемещается вдоль оси Ox на высоте h с постоянной путевой скоростью V_x (рис. 1). Пусть антенна радиолокатора ориентирована под углом визирования θ_0. Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) $G(\theta, \varphi)$ в плоскости yOz равна $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, где $\theta_{1,2}$ — начальный и конечный углы визирования. Общая длина полосы

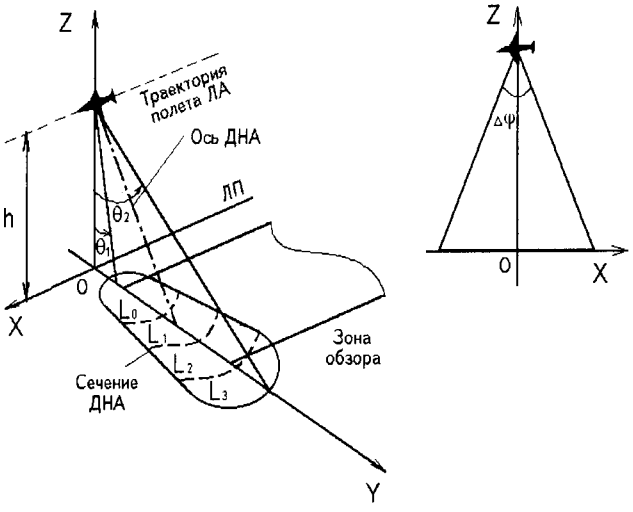


Рис. 1.

© Б. Г. ТЫСИК, А. С. КУРЕКИН, В. Б. ЕФИМОВ, А. С. ГАВРИЛЕНКО, И. А. КАЛМЫКОВ, В. Н. ЦЫМБАЛ, 2002

обзора по дальности равняется $L = h(1/\cos\theta_2 - 1/\cos\theta_1)$.

В азимутальной плоскости ДНА имеет ширину (по нулям основного лепестка) равную $\Delta\varphi$. Радиолокатор зондирует земную поверхность последовательностью сложных импульсных радиосигналов $S_n(t)$, $n = -\infty, ..., \infty$ (вообще говоря, различных) на центральной частоте f_0. Длительности этих импульсов одинаковы и равны τ_s, частота их повторения равна $F = 1/T$.

Если частота повторения выше некоторой пороговой частоты F^{max}, которая в рассматриваемом случае определяется из соотношения

$$F^{max} = \frac{c\cos\theta_1\cos\theta_2}{2h(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)},$$

где c — скорость света, то общая полоса обзора L разбивается на несколько подполос L_j, $j = 0, J - 1$. Число подполос $J = [F/F^{max}] + 1$ (здесь $[\cdot]$ — операция извлечения целой части). Отклики от целей, расположенных в различных полосах L_j, взаимно накладываются друг на друга. Причем, если цель расположена в полосе L_j, то ее отклик после n-го импульса будет равен $S_{n-j}(t - \tau)$, где τ — время задержки. Если в качестве зондирующих импульсов использовать сложные сигналы с различными характеристиками от импульса к импульсу и при их корреляционной обработке цели от «своей» полосы обзора будут выделены, а с «чужой» — подавлены, то можно разделить полосы обзора на РЛИ. Ясно, что при этом количество зондирующих сигналов с разной «окраской» должно быть не меньшим, чем количество разделяемых полос.

Заметим, что очевидный и самый простой способ ликвидации неоднозначности по дальности, а именно уменьшение частоты следования импульсов, в нашей ситуации неприемлем, так как для повышения разрешения по азимуту используется процедура синтезирования апертуры антенны. При этом, как известно [3], частота следования зондирующих импульсов не может быть ниже пороговой величины $F^{min} = 2V_x\Delta\varphi/\lambda$, где $\lambda = c/f_0$ — длина волны.

В случае, когда $F^{min} > F^{max}$, взаимное наложение откликов от полос обзора по дальности неизбежно будет иметь место в отраженном сигнале.

При излучении одного импульса $S_n(t)$ в точке $x_n = nV_x/F$ согласно принципу Гюйгенса — Френеля комплексная огибающая отраженного от полосы обзора сигнала $P_n(t)$ представляется в виде

$$P_n(t) = \int\int a(r, x)S_n(t - \tau_n)\exp(2\pi ic\tau_n/\lambda)\times$$
$$\times \frac{G(x - x_n)G(x - x_n - 2rV_x/c)}{R(r, x - x_n)R(r, x - x_n - 2rV_x/c)}\,drdx, \quad (1)$$
$$t = 0, ..., \infty.$$

Здесь $a(r, x)$ — комплексный коэффициент обратного рассеяния элемента разрешения с координатами (r, x), $R(r, x) = \sqrt{r^2 + x^2}$ — наклонная дальность от носителя до элемента разрешения (r, x), $r = \sqrt{y^2 + h^2}$ — проекция наклонной дальности на плоскость yOz, $\tau_n = [R(r, x - x_n)R(r, x - x_n - 2rV_x/c)]/c$ — время задержки сигнала отраженного от элемента разрешения (r, x).

При выводе представления (1) предполагалась частотная независимость диаграммы направленности $G(r, x)$ и сравнительная узкополосность сигнала (ширина спектра импульса Ω значительно меньше центральной частоты f_0).

Придадим выражению (1) более удобный для анализа вид, вводя несколько упрощающих предположений. Во-первых, пренебрежем эффектом «миграции» цели по дальности при движении носителя. Для этого во втором члене подынтегрального выражения положим, что время задержки равно

$$\tau_n \approx 2r/c.$$

Это предположение оправданно, когда ширина ДНА по азимуту $\Delta\varphi \ll 1$. Во-вторых, можно положить, что

$$\tau_n \approx 2R(r, x - x_n)/c.$$

Это означает, что мы пренебрегаем линейным изменением фазы сигнала за счет смещения носителя по азимуту за время между посылкой импульса и приемом отклика от цели. Условием для этого является выполнение неравенства

$$rV_x/c \le \lambda/\Delta\varphi.$$

Кроме того, будем полагать, что диаграмма направленности антенны имеет косекансную форму в угломестной плоскости и прямоугольную — в азимутальной. Тогда представление (1) преобразуется к виду

$$P_n(t) = \int\int a(r, x)S_n(t - 2r/c)S_{tr}(r, x - x_n)drdx, \quad (2)$$

где

$$S_{tr}(r, x) =$$
$$= \begin{cases} \exp[4\pi iR(r, x - x_n)/\lambda], & |x - x_n| < r\Delta\varphi/2, \\ 0 & |x - x_n| > r\Delta\varphi/2. \end{cases}$$

Подчеркнем, что все вышеперечисленные предположения и допущения не являются принципиальными ограничениями для развиваемого подхода. Они введены в основном с целью придать дальнейшим выкладкам менее громоздкий вид и упростить алгоритм обработки сигналов.

Используя (2), легко получить, что при зондировании земной поверхности бесконечной последовательностью импульсных сигналов, отличающихся своей «окраской», в условиях наличия неоднозначности по дальности, отраженный сигнал записыва-

ется в виде

$$P_{\text{п}}(t) = \sum_{\text{j}=0}^{\text{J}-1} \int\int a_{\text{j}}(r, x) S_{\text{п}-\text{j}}(t - 2r/c) S_{\text{tr}}(r + jr_{\text{p}}, x - x_{\text{п}}) dr dx,$$

$$t = 0, ..., T - \tau_{\text{s}}, n = -\infty, ..., \infty. \quad (3)$$

Здесь $a_{\text{j}}(r, x) = a(r + jr_{\text{p}}, x)$ — коэффициент обратного рассеяния от элемента разрешения, расположенного в полосе L_{j}; $r_{\text{p}} = cT/2$.

Более компактный вид имеет векторная форма записи (3):

$$P_{\text{п}}(t) = \sum_{\text{j}=0}^{\text{J}-1} \int\int \mathbf{a}_{\text{j}}(r, x) \mathbf{D}^{\text{T}}(t - 2r/c, r, x - x_{\text{п}}) dr dx, \quad (4)$$

где $\mathbf{a}(r, x) = \{a(r + jr_{\text{p}}, x),\ j = 0, ..., J - 1\}$ — вектор-столбец; $\mathbf{D}(t, r, x - x_{\text{п}}) = \{S_{\text{п}-\text{j}}(t) S_{\text{tr}}(x - x_{\text{п}}, r + jr_{\text{p}}),\ j = 0, ..., J - 1\}$ — вектор-столбец.

Таким образом, видим, что отраженный сигнал представляет собой некоторое интегральное преобразование от искомой векторной функции с векторным дискретно-непрерывным квазиразностным ядром $\mathbf{D}(t, r, x - x_{\text{п}})$.

В ситуации, когда излучаемые импульсы не все различны, а используется пачка K различных импульсов, которая периодически повторяется ($S_{\text{j}+n\text{K}}(t) = S_{\text{j}}(t)$, $n = -\infty, ..., \infty$, $j = 1, ..., K$; $K \geq J$), и число импульсов в пачке значительно меньше числа отсчетов по азимуту, при котором цель находится в пределах ДНА, то можно придать представлению (4) чисто непрерывный характер, а именно:

$$P_{\text{п}}(t, x') = \int\int \mathbf{a}_{\text{j}}(r, x) \mathbf{D}_{\text{j}}^{\text{T}}(t - 2r/c, r, x - x_{\text{п}}) dr dx, \quad (5)$$

$$t = 0, ..., T - \tau_{\text{s}}, \quad n = -\infty, ..., \infty.$$

где

$$\mathbf{D}_{1,\text{j}}(t, r, x - x') = \sum_{\text{j}=0}^{\text{K}-1} S_{\text{j}}(t) S_{\text{tr}}^{(\text{j})}(x - x', r + jr_{\text{p}}),$$

$$S_{\text{tr}}^{(\text{j})}(x - x') = \sum_{\text{n}=-\infty}^{\infty} S_{\text{tr}}(x - x_{n\text{K}+\text{j}}, r + jr_{\text{p}}) \xi(x' - x_{n\text{K}+\text{j}}),$$

$\xi(x' - x_{n\text{K}+\text{j}})$ — базис Котельникова.

Последнее представление и положено в основу дальнейшего анализа.

2. ДВУМЕРНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВХОДНОГО СИГНАЛА

Здесь нашей задачей является построение алгоритма нахождения наилучшей возможной оценки для коэффициента обратного рассеяния $\mathbf{a}(r, x)$ по известному сигналу на входе радиолокационного приемника в условиях аддитивного белого шума. Тогда комплексная огибающая входного сигнала $V_{\text{п}}(t)$ представляет собой сумму отраженного сигнала $P_{\text{п}}(t)$ и шума $\eta_{\text{п}}(t)$:

$$V_{\text{п}}(t) = P_{\text{п}}(t) + \eta_{\text{п}}(t).$$

Поскольку статистические характеристики случайного процесса $\eta_{\text{п}}(t)$ заранее неизвестны, то оптимальную оценку дает критерий максимального правдоподобия [2].

Его применение для рассматриваемого случая показывает, что наилучшей оценкой для $\mathbf{a}(r, x)$ является функция $\hat{\mathbf{a}}(r, x)$, минимизирующая функционал

$$I(\hat{\mathbf{a}}(r, x)) = \sum_{\text{n}=-\infty}^{\infty} \int_0^{\text{T}-\tau_{\text{s}}} |V_{\text{п}}(t) - P_{\text{п}}(\hat{\mathbf{a}}(r, x), t)|^2 dt. \quad (6)$$

При поиске наилучшей оценки $\hat{\mathbf{a}}(r, x)$ в классе корреляционных интегралов

$$\hat{\mathbf{a}}(r', x') = \sum_{\text{n}=-\infty}^{\infty} \int_0^{\text{T}-\tau_{\text{s}}} V_{\text{п}}(t) \mathbf{D}_{\text{O}}(t - 2r'/c, x' - x_{\text{п}}, r') dt,$$

где $\mathbf{D}_{\text{O}}(t - 2r'/c, x, r')$ — опорный сигнал, минимальное значение функционала (6) достигается при

$$\mathbf{D}_{\text{O}}(t, x, r') = \text{const}\overline{\mathbf{D}}^{\text{T}}(-t, -x, r')$$

(согласованная или оптимальная фильтрация входного сигнала). Чертой сверху обозначена комплексно сопряженная величина.

Мерой качества алгоритма обработки при выбранных зондирующих сигналах является двумерная матричная функция неопределенности

$$\mathbf{U}(r - r', x', r) = \sum_{\text{n}=-\infty}^{\infty} \int_0^{\text{T}-\tau_{\text{s}}} V_{\text{п}}(t) \times$$

$$\times \mathbf{D}_{\text{O}}\left(t - \frac{2r'}{c}, x' - x_{\text{п}}, r'\right) \mathbf{D}^{\text{T}}\left(t - \frac{2r}{c}, x_{\text{п}}, r\right) dt. \quad (7)$$

С физической точки зрения функция $U_{\text{ij}}(r', x, r)$ представляет собой радиолокационное изображение (РЛИ) полосы обзора L_{i}, полученное как результат корреляционной обработки входного сигнала опорным $\mathbf{D}_{\text{O}}$ при наличии точечной цели, расположенной в полосе L_{j} в точке азимута $x = 0$ на наклонной дальности r и отсутствии других целей и шумов. Ясно, что наилучшие результаты будут достигнуты при

$$\mathbf{U}(r', x, r) \longrightarrow \mu \mathbf{I} \delta(x) \delta(r'),$$

где $\mathbf{I}$ — единичная матрица, μ — коэффициент усиления. В этом случае в результате корреляционной обработки элементы отражения со «своей» полосы обзора выделяются, а с «чужой» — подавляются.

Дальнейшие исследования связаны с анализом

свойств компонентов матрицы-функции $\mathbf{U}(r', x, r)$ при зондировании земной поверхности периодически повторяющейся бесконечной последовательностью импульсных сигналов с различной «окраской» $S_{j+nK}(t) = S_j(t)$, $n = -\infty, \ldots, \infty$, $j = 1, \ldots, J$. Нами рассмотрены наиболее существенные величины, связанные с этой функцией, а именно: коэффициент усиления μ, коэффициент сжатия k и уровень подавления мешающих отражений M ([1]).

Коэффициент усиления определяется как $\mu_i = U_{ii}(0, 0, r)B_S/\tau_S$, где B_S — база сигнала (или $10\log(U_{ii}(0, 0, r)B_S/\tau_S)$, дБ). Он характеризует выигрыш, достигаемый в соотношении «пиковая мощность двумерного сигнала $\mathbf{D}$/мощность шума» в результате корреляционной обработки. Нормировочный коэффициент B_S/τ_S введен для удобства. Он равен отношению мощностей шума до и после согласованной фильтрации сигнала $S_n(t)$ в случае, когда ширина полосы приемника согласована с шириной спектра этого сигнала. Что касается траекторного сигнала, то поскольку он является дискретным, дополнительной нормировки азимутальной компоненты шума не требуется. Ясно, что коэффициент усиления при азимутальной обработке прямо пропорционален частоте зондирования. Заметим, что если амплитудная модуляция в двумерном сигнале отсутствует ($|\mathbf{D}| = \text{const}$), то выражение для μ_i зависит только от базы этого сигнала, а именно: $\mu_i = B_{tr}B_S$ (B_{tr} — база траекторного сигнала). Коэффициенты сжатия по азимуту k_x и дальности k_r определяются как $k_x = \delta_x/(r\Delta\varphi)$, $k_r = 2\delta_r(c\tau_S)$, где $\delta_{x,r}$ — размеры главных сечений основного лепестка $\mathbf{U}$ по осям Ox и Or соответственно. Другими словами, это величины пространственного разрешения по азимуту и дальности. Заметим, что значение δ_x, получаемое при согласованной фильтрации азимутальной компоненты сигнала чаще называют потенциально достижимым разрешением. Дело в том, что в процессе формирования и прохождения по тракту передачи (включая в это понятие и свободное пространство между приемником и передатчиком) сигнал $\mathbf{D}(r, x)$ претерпевает непрогнозируемые искажения, не сводящиеся к аддитивным шумам. Это в первую очередь фазовые искажения, а также шумы зернистости (спекл-шумы), которые связаны с узкополосностью радиолокационных сигналов. Оба эти вида шумов носят мультипликативный характер и вносят искажения в основном в траекторный компонент сигнала. Чтобы уменьшить их влияние, длину интервала синтезирования по азимуту X выбирают обычно значительно меньше принципиально возможной $r\Delta\varphi$. То есть, вместо согласованной фильтрации по азимуту проводят квазисогласованную. При этом, естественно, как коэффициент усиления, так и коэффициент сжатия уменьшаются в $X/(r\Delta\varphi)$ число раз.

Уровень подавления мешающих отражений от перекрывающихся полос обзора (УПМО) M_{ij} определяется как

$$M_{ij} = \left| \frac{U_{ij}(r, x, r')}{U_{ij}(0, 0, r')} \right|,$$

и характеризует степень подавления в полосе L_i мешающих отражений, находящихся в полосе L_j. Для удобства введем также две вспомогательные величины: уровень боковых лепестков (УБЛ) $M = \max\limits_{j} M_{jj}$ и уровень развязки полос обзора (УРПО) $M_p = \max\limits_{i,j} M_{ij}$, $i \neq j$. В ситуации, когда УБЛ не удовлетворяет наперед заданным требованиям, его величину можно понизить путем применения весовой обработки (аподизации) сигнала. Эта обработка заключается в сглаживании краев амплитудного спектра сигнала с помощью монотонно убывающей весовой функции (функции окна) [1].

С учетом вышесказанного в явном виде функцию $U_{ij}(r', x, r)$ можно представить как

$$U_{ij}(r', x, r) = \sum_{k=0}^{J-1} F_{(i+k)_J, (j+k)_J}(r') \times$$

$$\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{tr}^{O}(x_{nJ+k} - x, r + jr_p) S_{tr}(x_{nJ+k}, r + jr_p). \quad (8)$$

Здесь $F_{(i+k)_J, (j+k)_J}(r')$ — автокорреляционная функция сигналов $S_{(i+k)_J}(t)$ и $S_{(j+k)_J}(t)$, $(i+k)_J$ — операция сложения по модулю J, S_{tr}^{O} — опорный траекторный сигнал:

$$S_{tr}^{O}(x, r) =$$

$$= \begin{cases} \Psi(x)\exp[4\pi i R(r, x - x_n)/\lambda], & |x - x_n| < X/2, \\ 0, & |x - x_n| > X/2, \end{cases}$$

где $\Psi(x)$ — весовая функция.

Из выражения (8) видно, что необходимым условием разделения полос обзора по дальности является нахождение таких сигналов $S_j(t)$, которые имеют заданные коэффициент сжатия и усиления, а также минимальное значение $M^{\min}$, характеризующее уровень подавления мешающих отражений M_{ij}, то есть

$$M^{\min} = \min_{S_j(t)} \max_{i,j} F_{ij}(r'), \quad |r'| > \delta_r/2 \quad \text{при } i = j. \quad (9)$$

Критерий (9) может быть положен в основу метода поиска оптимальных сигналов, обеспечивающих максимум развязки полос обзора по дальности. Он является общим и не зависит от того, будет ли производиться корреляционная обработка РЛИ по азимуту. Величина $M^{\min}$ характеризует максимальный УПМО после проведения корреляционной

обработки по дальности.

В то же время учет вида траекторного компонента двумерного сигнала позволяет получить более точный критерий, который позволяет снизить УПМО за счет обработки РЛИ по азимуту. Он будет эффективен только при достаточно высокой частоте зондирования и малом количестве перекрывающихся полос обзора, то есть в тех же условиях, при которых справедливо представление (5). Действительно, можно показать, что в этом случае

$$U_{ij}(r', x, r) \approx F_{ij}^{tr}(x, r)\sum_{k=0}^{J-1} F_{(i+k)_J,\,(j+k)_J}(r')\exp(2\pi ikxV_x T),$$

где $F_{ij}^{tr}(x, r)$ — взаимнокорреляционная функция i-го опорного и j-го отраженного траекторных сигналов.

Таким образом, боковые лепестки функции $U_{ij}(r', x, r)$ зависят только от суммы боковых лепестков взаимнокорреляционных функций зондирующих сигналов, умноженных на фазовые множители, зависящие от x и периода T следования импульсов. Учитывая, что максимальный уровень боковых лепестков наблюдается на главном сечении $x = 0$ (здесь они велики за счет сжатия сигнала по азимуту), в качестве критерия для поиска зондирующих сигналов можно взять следующий:

$$M^{\min} = , \ |r'| > \delta_r/2 \text{ при } i = j. \qquad (10)$$

Отсюда видно, что суммирование сигналов при синтезировании апертуры может существенно уменьшить уровень мешающих отражений, если только удастся найти сигналы с противофазными боковыми лепестками, которые взаимно компенсируются.

Таким образом, при заданных коэффициентах сжатия необходимо найти такие зондирующие сигналы, которые должны обеспечить:

— минимум боковых лепестков по дальности;

— минимальную корреляционную связь между импульсами различной «окраски».

3. ПРОЦЕДУРА ОТБОРА ГРУПП КФМ-СИГНАЛОВ С ОПТИМАЛЬНЫМИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Целью данного раздела является построение алгоритма выбора J сигналов с равными коэффициентами усиления и сжатия и минимальным уровнем боковых лепестков их авто- и взаимнокорреляционных функций. Методика выбора строится для сигналов с дискретной фазовой модуляцией, комплексная огибающая которых имеет вид

$$S_j(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n^j u(t - n\tau).$$

Здесь $u(t)$ — парциальный импульс длительности τ; $a_n = \exp(i\varphi_n^j)$ — комплексная амплитуда парциального импульса. Последовательность $A_j = \{a_n^j, n = 0, ..., N - 1\}$ называется кодовой последовательностью j-го КФМ-сигнала. В качестве парциального импульса используется прямоугольный импульс единичной амплитуды, как наиболее простой в реализации. Легко видеть, что как коэффициент сжатия, так и коэффициент усиления сигналов S_j пропорциональны длине последовательности N. Кроме того, можно показать, что максимальные боковые лепестки авто- и взаимнокорреляционных функций сигналов S_j равны максимальным боковым лепесткам дискретных корреляционных функций соответствующих кодовых последовательностей [2]. Поэтому в дальнейшем рассматриваются только эти дискретные корреляционные функции R_n^{jk}, которые определяются как $R_n^{jk} = \sum_{m=0}^{N-n-1} a_m^j a_{m+n}^k$, $n = 0, ..., N - 1$. Будем полагать, что фаза парциального импульса φ_n^j может принимать только квантованные значения вида $2\pi p/P$, $p = 0, ..., P - 1$.

Такой выбор объекта исследований обусловлен двумя соображениями. Во-первых [2], известен ряд хорошо разработанных алгоритмов построения кодовых последовательностей с минимальным уровнем боковых лепестков (коды Баркера, последовательности максимальной длины (М-последовательности), коды Лежандра и т. д.). Во-вторых, с ростом длины последовательности количество таких «хороших» кодов возрастает, причем фазовые зависимости их спектров имеют существенно различный вид. Это позволяет среди всего множества кодов равной длины отыскать J таких, взаимная корреляция между которыми стремится к нулю (ортогональных кодов). Здесь следует сделать одно важное уточнение. Заведомо бессмысленно ожидать ортогональности от двух кодов, различие между которыми сводится к циклической перестановке составляющих их элементов. Можно показать, что эти коды являются почти вырожденными по отношению к уровню взаимной корреляции межу ними. Точнее, максимальную взаимную корреллляцию здесь нельзя снизить на уровень больший, чем −3 дБ.

Известно, что наибольшее количество кодов с УБЛ, пропорциональным $1/\sqrt{N}$ можно построить в случае, когда длина последовательности равна простому числу вида $N = P^k - 1$. В основном эти коды относятся к группе так называемых усеченных М-последовательностей. Их количество велико вследствие того фундаментального факта, что циклическая перестановка М-последовательности так-

же является М-последовательностью. Количество N_v различных М-кодов, не сводящихся к циклическим перестановкам, определяется функцией Эйлера от длины последовательности. Они могут быть получены как коэффициенты первообразных (примитивных) полиномов, делящих полином $z^N - 1$.

Учитывая вышеизложенное, построим поэтапный алгоритм, позволяющий из всех кодов длины N, относящихся к группе М-последовательностей, выделить J таких, взаимная корреляция между которыми минимальна.

Этапы алгоритма:

1. Построение N_v различных, не сводящихся к циклическим перестановкам М-множеств A_j длины N. Каждому из сформированных множеств A_j ставим в соответствие производные множества

$$A_{js} = \{a^j_{(n+s)_N},\ n = 0, ..., N-1\};$$

$$j = 0, ..., N_v - 1;\quad s = 0, ..., N-1,$$

являющиеся s-ми циклическими перестановками исходных последовательностей. Индекс s в дальнейшем используется как переменная, с помощью которой проводится оптимизация корреляционных характеристик при выборе групп кодовых последовательностей.

2. Перебор полученных множеств по индексу s и выделение тех из них, для которых выполняется условие минимакса УБЛ автокорреляционных функций, а именно:

$$R_j^{\min} = \min_s \max_n |R_n^{(j,s),\,(j,s)}|. \qquad (11)$$

Наименование выделенных множеств строится по формату:

$$M_j_s_j^{\min}_R_j^{\min}.$$

Здесь $s_j^{\min}$ — значение индекса s при котором выполняется (11).

Полученные последовательности использовались в дальнейшем в качестве базовых.

3. Для полученной базовой группы последовательностей строится матрица $N_v \times N_v$ с элементами, которые находятся как

$$R_{jk} = \max_n |R_n^{(j,s_j^{\min}),\,(k,s_k^{\min})}|.$$

Из этой матрицы выделяется J множеств с теми номерами j_n, $n = 0, ..., J-1$, для которых достигается условие минимальности максимального из элементов R_{j_n, j_m}.

4. Для выделенных последовательностей производится перебор по индексу s (циклическая сдвижка) с целью дальнейшего снижения взаимнокорреляционных максимумов. Сначала этот перебор производится отдельно для каждой пары выделенных множеств с целью определения минимально возможного уровня взаимной корреляции. Число имеющихся здесь вариантов равно $J \times N \times N$. Затем производится полный перебор для всех множеств. Выделение нужных последовательностей производится по критерию (9) или (10).

В случае, если полный перебор N^J вариантов невозможен из-за ограниченности вычислительных ресурсов ЭВМ, проводятся расчеты с укрупненным шагом по каждому из смещений. Фиксируется точка с улучшенным значением минимакса и выполняется поиск с шагом 1 в узкой окрестности этой точки.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты были проведены для групп из четырех кодовых последовательностей длины 127, то есть использовались значения $J = 4$, $N = 127$, $Nv = 18$. Значения a_n^j брались равными ± 1 ($P = 2$). Ниже приведен протокол вычислений для каждого из этапов алгоритма проектирования.

1. Построены 18 М-множеств длины 127 по известным формулам.

2. Выделены следующие 18 производных множеств:

M1_s55_max_9; M2_s106_max_9;
M3_s127_max_8; M4_s28_max_9
M5_s101_max_9; M6_s53_max_9;
M7_s100_max_10; M8_s33_max_9;
M9_s17_max_22; M10_s7_max_9;
M11_s114_max_9; M12_s20_max_9;
M13_s34_max_10; M14_s81_max_9;
M15_s52_max_9; M16_s7_max_8;
M17_s35_max_9; M18_s7_max_10.

3. Для полученной базовой группы построена матрица 18×18, содержащая значения максимальных боковых лепестков корреляционных функций производных множеств. Диагональные элементы этой матрицы были минимизированы на этапе 2, и их значения в основном находятся в диапазоне от 8 до 10. Из этой матрицы выделены следующие множества:

M2_s106_max_9; M3_s127_max_8;
M6_s53_max_9; M15_s52_max_9.

В этих множествах значения векторов всех корреляционных функций не превышают по абсолютной величине 23:

$$\begin{pmatrix} i\backslash j & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 9 & 23 & 22 & 21 \\ 2 & 20 & 8 & 20 & 22 \\ 3 & 22 & 23 & 9 & 23 \\ 4 & 23 & 21 & 20 & 9 \end{pmatrix}.$$

4. Исследовалась возможность дальнейшего сни-

жения взаимнокорреляционных максимумов выделенного множества. С этой целью отдельно для каждой пары выделенных множеств проведена оптимизация путем полного перебора по двум переменным s1, s2. Число всех вариантов для каждой пары 127·127.

Результаты оказались следующими:

Упр. индексы (1 2), min_max = 18,
Упр. индексы (3 4), min_max = 18,
Упр. индексы (1 3), min_max = 18,
Упр. индексы (2 3), min_max = 18,
Упр. индексы (1 4), min_max = 17,
Упр. индексы (2 4), min_max = 18.

Проведенный анализ показал, что граничным значениям минимакса является значение 18 и для дальнейшего улучшение матрицы перекрестных максимумов необходимо выполнить оптимизацию по переменным s1, s2, s3, s4.

5. Получение кодов, оптимальных по критерию (9).

Полный перебор 127·127·127·127 вариантов из-за ограниченности вычислительных ресурсов оказался затруднительным. В связи этим проведены расчеты с укрупненным шагом по каждому из смещений. Ниже приведен протокол вычислений.

Протокол вычислений

Шаг	Интервал поиска	Значение минимакса	Координаты минимакса
30	0—127, 0—127, 0—127, 0—127	22	0, 30, 60, 30
12	0—127, 0—127, 0—127, 0—127	21	12, 60, 0, 84
4	8—16, 52—68, 0—12, 78—92	20	13, 57, 0, 84
1	10—20, 50—60, 125—135, 70—80	20	14, 57, 0, 84

Из протокола видно,что две близкие точки дали одинаковый результат. Это говорит о плавном изменении оптимизируемой функции, благодаря которому процесс поиска с укрупненным шагом и последующим уточнением по более узкой окрестности является сходящимся процессом.

Итак, выбрана следующая группа кодовых последовательностей оптимальных по критерию (9):

1) множество M2_s106_max_9+s13;
2) множество M3_s127_max_8+s57;
3) множество M6_s53_max_9+s0;
4) множество M15_s52_max_9+s84.

Для них матрица перекрестных лепестков имеет вид

$$\begin{pmatrix} i\backslash j & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 10 & 19 & 18 & 19 \\ 2 & 20 & 11 & 19 & 20 \\ 3 & 19 & 19 & 9 & 20 \\ 4 & 20 & 19 & 19 & 1 \end{pmatrix}.$$

Полученные множества использовались в качестве исходных. В дальнейшем была произведена оптимизация по индексам s1, s2, s3, s4 с шагом перебора, равным 5. Найдено значение минимакса, равное 36, для следующей группы кодовых последовательностей:

M2_s106_max_9+s13+s5; M3_s127_max_8+s57+s90;
M6_s53_max_9+s0+s20; M15_s52_max_9+s84+s85.

При этом матрица перекрестных лепестков этих последовательностей имела вид:

$$\begin{pmatrix} i\backslash j & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 12 & 21 & 19 & 22 \\ 2 & 19 & 11 & 23 & 19 \\ 3 & 24 & 19 & 11 & 23 \\ 4 & 22 & 23 & 19 & 10 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, найдены две группы последовательностей оптимальных по двум критериям. Как показывает проведенный анализ с помощью этих последовательностей можно получить УБЛ не хуже −22 дБ и уровень перекрестных лепестков не хуже −16 дБ. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена автокорреляционная функция для последовательности M2_s106_max_9+s13+s5.

Рассмотрим теперь пример использования найденных кодовых последовательностей для расширения полосы обзора космической РСА системы. Пусть космический носитель перемещается по орбите на высоте 650 км со скоростью 6.8 км/с. Антенная система бортового радиолокатора обеспечивает ширину диаграммы по уровню 3 дБ: в азимутальной плоскости 0.57° и в угломестной плоскости 23°. Начальный угол визирования равен 20°. Разрешающую способность радиолокатора предположим равной 20×20 м^2. Отсюда следует (см. п. 1.), что минимальная частота зондирования составляет 4.53 кГц, а максимальная протяженность полосы однозначности по дальности — 96.5 км. Таким образом, выбранная полоса обзора шириной в 369 км содержит 4 подполосы L_j, в которых имеет место взаимное наложение отраженных сигналов. Так, например, пусть одиночная цель расположена во второй подполосе на наклонной дальности

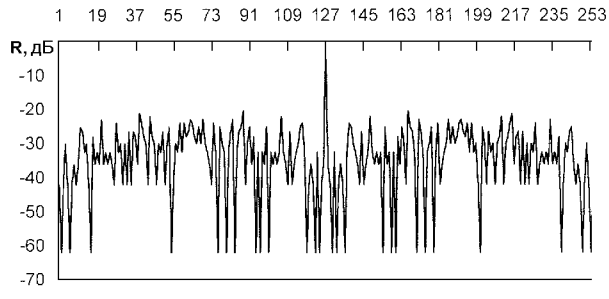


Рис. 2. АКФ для последовательности M2_s106_max_9+s13+s5

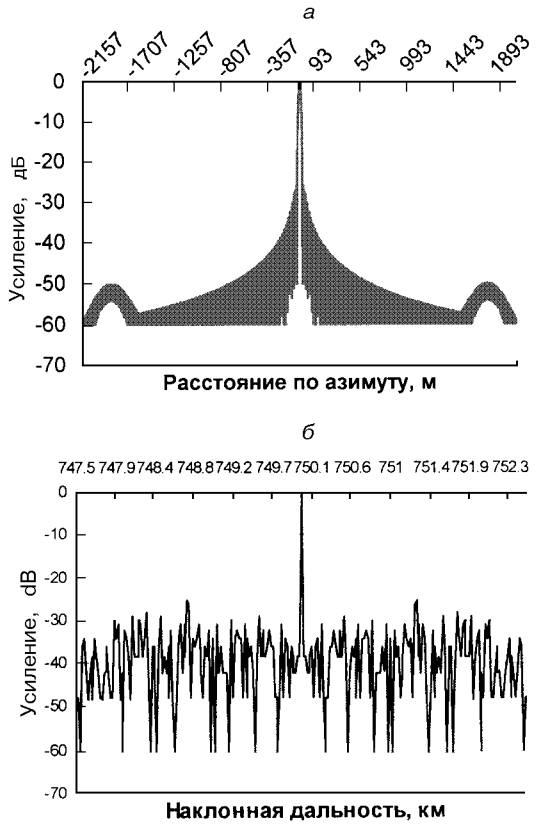


Рис. 3. Главные сечения РЛИ цели

750 км. Проводя корреляционную обработку численно смоделированного отраженного сигнала по азимуту и наклонной дальности, убеждаемся, что при заданном уровне разрешения УБЛ не превышает величины −25 дБ. Иллюстрирует результат данной обработки рис. 3, на котором представлены главные сечения РЛИ цели в азимутальной и угломестной плоскостях. Видно, что УБЛ не превышает величины −28 дБ по азимуту и −25 дБ по углу места. Вне главных сечений уровень подавления сигнала существенно выше. Сравнивая зависимости на рис. 2 и 3, б, видим, что, как и указывалось ранее, накопление сигнала при синтезировании апертуры позволяет снизить уровень боковых лепестков. Та же закономерность наблюдается при корреляционной обработке отклика цели в соседней полосе. Здесь уровень подавления сигнала также не превышает −25 дБ.

Численные эксперименты, проведенные при различных местоположениях цели в различных подполосах L_j, дали похожие результаты. Порядок следования зондирующих импульсов, как и ожидалось, практически не влиял на величину УБЛ и УРПО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что предложенный метод устранения неоднозначности по дальности в радиолокационных системах с высоким пространственным разрешением является вполне работоспособным и позволяет обеспечить расширение полос обзора в несколько раз без потери разрешения. Как установлено выше, в достаточно богатом множестве кодовых усеченных М-последовательностей равной длины существуют такие коды, которые имеют высокий уровень взаимной развязки. Причем как их количество, так и уровень развязки повышаются с ростом длины последовательностей. Это позволяет применить данный подход для проектирования РЛС систем различного назначения, удовлетворяющих широкому диапазону требований на УБЛ и уровни развязки перекрывающихся полос обзора.

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. — М.: Радио и связь, 1988.—304 с.
2. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. — М: Сов. радио, 1970.—376 с.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М: Радио и связь, 1970.—376 с.
4. Френкс Л. Теория сигналов. — М: Сов. радио, 1974.—344 с.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 287—288

Критерий качества радиолокационного изображения когерентных систем дистанционного зондирования

О. В. Сытник, А. В. Кабанов, В. Б. Ефимов, А. С. Курекин, В. Н. Цымбал

Центр радиофизического зондирования Земли НАН и НКА Украины им. А. И. Калмыкова, Харьков

Радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны (РСА) находят широкое применение при решении различных научных и практических задач. РСА позволяют получать радиолокационное изображение земной поверхности и расположенных на ней объектов независимо от времени суток, уровня освещенности, облачности, осадков и других факторов, мешающих работе оптических систем наблюдения. Принцип действия РСА основан на использовании перемещения бортовой антенны локатора вдоль линии полета и одновременной записи когерентных импульсных сигналов для последующего формирования антенной решетки больших размеров [1]. Интенсивность сигнала на выходе такой «фиктивной» антенной решетки, представленная в координатах азимут—дальность и есть радиолокационное изображение подстилающей поверхности.

Отличие реальной траектории от модели приводит к ошибкам при воспроизведении радиолокационных изображений. Так, например, ошибки в положении координаты носителя приводят к общему смещению изображения, и как результат — к ошибкам целеуказания. Ошибка в скорости приводит соответственно к расфокусировке изображения (т. е. потере разрешающей способности) и снижению потенциала РСА в целом. Ошибки по ускорению движения делают синтезированную диаграмму направленности (ДН) антенны несимметричной, приводят к росту уровня боковых лепестков синтезированной ДН антенны, снижению потенциала и расфокусировке изображения [3].

Само понятие «качество изображения» в значительной мере зависит от назначения радиолокационной системы и от требований к решению конкретных радиофизических задач. Так, для локатора, предназначенного для работы с пространственно-распределенными целями, важнейшим показателем качества являются величина и количество градаций яркости, различимых на изображении (контрастно-фоновая чувствительность). Локатор, решающий задачи целеуказания, должен иметь возможность получать снимки поверхности с предельным пространственным разрешением контрастных целей на однородном фоне. Задачи картографирования требуют минимальных ошибок смещения и геометрических искажений объектов на изображениях. Легко видеть, что эти требования противоречивы. С другой стороны, разработка и создание узкоспециализированных РСА-систем оказывается экономически неоправданным. В особенности это относится к системам космического базирования.

Поэтому целесообразно создание технических средств дистанционного зондирования подстилающей поверхности многофункционального профиля и оптимизация цифровой обработки с учетом специфики конкретных прикладных задач. Информативность таких систем исследовалась, в частности, в работе [2]. Однако такой подход не дает ответа на вопрос относительно оптимальности собственно изображений. В докладе обсуждаются пути построения обобщенных критериев, в которых увязаны характеристики системы наблюдения, характеристики платформы носителя РСА и параметры радиолокационного изображения.

Анализ различных радиолокационных изображений подстилающих поверхностей, полученных различными РСА-системами, показывает, что для большинства практически важных задач по тематической обработке изображений необходимо учитывать не более четырех-пяти факторов, характеризующих многомерные функции неопределенности радиолокационных систем. В частности, это:

1) разрешающая способность локатора δ_{az} по контрастным точечным целям в азимутальной плоскости;

© О. В. СЫТНИК, А. В. КАБАНОВ, В. Б. ЕФИМОВ, А. С. КУРЕКИН, В. Н. ЦЫМБАЛ, 2002

2) отношение $P_{ml/sl}$ мощности сигнала принятого по главному лепестку синтезированной ДН к мощности сигналов по боковым лепесткам (способность системы различать радиолокационные контрасты);

3) максимальный уровень боковых лепестков P_{sl} (характеристика повторов или пятнистости изображения);

4) искажения формы главного лепестка синтезированной ДН, выраженные средней квадратичной ошибкой σ_{ml} по отношению к неискаженной ДН.

Совместно эти показатели можно рассматривать как некоторый обобщенный критерий качества. На его основе введем функцию цели оптимизационной задачи, где показатели критерия выступают в качестве параметров: $Q(\delta_{az}, P_{ml/sl}, P_{sl}, \sigma_{ml})$. В простейшем случае зависимость этой функции от параметров можно выразить в следующем виде:

$$Q = \frac{\gamma_1 P'_{ml/sl}}{\gamma_2 \delta'_{az} + \gamma_3 P'_{sl} + \gamma_4 \sigma'_{ml}}, \qquad (1)$$

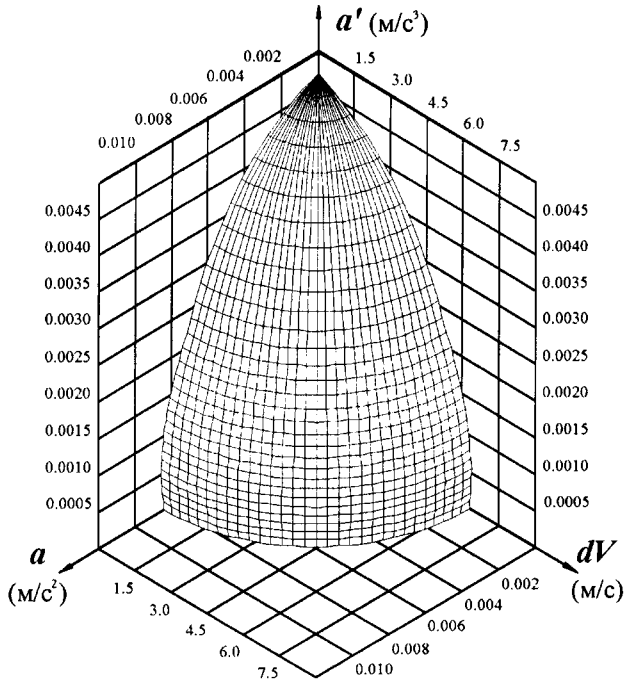
где штрихом отмечены нормированные к потенциальному значению величины соответствующего показателя критерия, а коэффициенты γ, $i = 1 \ldots 4$ определяют вес каждого показателя.

Таким образом, решение параметрической оптимизационной задачи сводится к максимизации функции (1) по ее параметрам. С другой стороны каждое значение функции (1) для фиксированных параметров δ_{az}, $P_{ml/sl}$, P_{sl}, σ_{ml} есть совокупность требований к алгоритму обработки, аппаратуре, системе стабилизации и измерения параметров движения носителя РСА.

Максимизация целевой функции (1) путем выбора вида опорной функции и перебора ее параметров позволяет еще на этапе проектирования РСА построить поверхности допустимых траекторных ошибок с учетом требований конкретных задач обработки сигналов. Причем каждая точка на этих поверхностях будет соответствовать локальному экстремуму целевой функции (1), ограничивающему предельно допустимые неучтенные ошибки в оценке параметров движения платформы.

Для иллюстрации сформирована поверхность допустимых ошибок при следующих значениях параметров: скорость v = 180.0 м/с, наклонная дальность r = 15000 м, длина волны λ = 1.8 м и требованиях δ_{az} = 8.3 м, $P_{ml/sl}$ = −6 дБ, P_{sl} = −20 дБ, σ_{ml} = 2.0 м, целевой функции (1) при γ_i = 1 и весовой функции Хэмминга в системе координат «скорость dV, ускорение a, производная от ускорения a'» (рисунок).

Таким образом, для каждой системы дистанционного зондирования при фиксированных точностях измерителей параметров движения платформы носителя РСА возможно получение заданных характеристик результирующего изображения и оптимизация их с учетом требований конкретных радиофизических задач. Однако рассмотренный подход позволяет решать и обратную задачу оценки потенциальных возможностей многофункциональной системы дистанционного зондирования еще на этапе ее проектирования, а также обоснованно формулировать требования к системам стабилизации платформы и измерения дестабилизирующих факторов. Кроме того, при разработке алгоритмов синтезирования апертуры, предназначенных для работы в реальном масштабе времени на борту носителя РСА, возможно задание поверхностей допустимых ошибок в табличном виде в память бортового компьютера в качестве критерия, что позволит организовать автоматическое переключение режимов работы локатора в зависимости от выполняемой в данный момент задачи и условий полета.



Поверхность максимально допустимых ошибок

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. — М.: Радио и связь, 1988.

2. Калмыков А. И., Синицын Ю. А., Сытник О. В., Цымбал В. Н. Информативность радиолокационных систем зондирования земли из космоса // Изв. Вузов СССР. Радиофизика.—1989.—**32**, № 9.—С. 1055—1062.

3. Томиясу К. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры и их применение для отображения поверхности океана // ТИИЭР.—1978.—**66**, № 1.—С. 40—67.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 289—296

Определение количества свежевыпавших осадков по радиолокационным данным ИСЗ «Січ-1»

И. А. Калмыков[1], **А. Г. Боев**[2], **В. Б. Ефимов**[1]

[1]Центр радиофизического зондирования Земли НАН и НКА Украины, Харьков

[2]Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков

Проблема определения влажности почвы является одной из важных при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Принципиальная возможность определения интенсивности свежевыпавших осадков (в дальнейшем дождевой влажности почвы) дистанционными радиофизическими методами и связанной с ней влажности почвы известна давно [4]. Она базируется на связи параметров зондирующего сигнала с геометрическими и физическими характеристиками земного покрова. Исследование влажности и солености в верхнем слое почвы проводится с использованием различных систем ДЗЗ, работающих во всем спектре электромагнитных волн. Применение оптических и ИК-систем, работающих в диапазоне от 0.2 до 20 мкм часто затруднено из-за метеорологических условий во время съемки [15]. Зондирование же в диапазоне сантиметровых и метровых длин волн (СВЧ-диапазон) свободно от этого недостатка. С развитием космических радиолокационных систем появилась возможность определения влажностей почвенного покрова на больших площадях. Для практики это имеет большое значение, так как они дополняют данные контактных измерений, носящих выборочный характер.

В работе предложен алгоритм определения поверхностной последождевой влажности и солености почвы, который использует специфику космического мониторинга: возможность достаточно частого обзора одного и того же района местности под различными углами падения, до и после дождей, в различные сезонные периоды, а так же то, что для практических нужд, как правило, достаточно обычной интегральной оценки влажности почвы.

Используя данные радиолокационной съемки одного из равнинных районов в течение 2—3 дней на волне λ = 3.1 см и под двумя углами падения Θ = = 40° и 28°, в период, когда растительность еще не развита, удалось оценить влажность и соленость почвы после выпавшего дождя.

Полученные значения этих величин согласуются с данными контактных измерений в этом районе.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЧВЫ

Радиолокационный метод определения влажностного состояния почв основан на зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) от процентного содержания влаги и солей [11]. Согласно [11] зависимость КДП почвы $\tilde{\varepsilon}$ от влажности W в сантиметровом диапазоне радиоволн имеет линейный характер:

$$\tilde{\varepsilon}_{\text{д}} = 1 + 0.7d(\tilde{\varepsilon}_{\text{w}}W + 1), \qquad (1)$$

где d — удельный вес сухого грунта (г/см^3), $\tilde{\varepsilon}_{\text{w}}$ — КДП воды с растворенными в ней солями, W — относительная влажность почвы (%). Для сухого грунта (W = 0) величина $\tilde{\varepsilon}$ является комплексной, но значение мнимой части весьма мало по сравнению с вещественной, поэтому условно будем считать $\tilde{\varepsilon}$ сухого грунта вещественной со значениями 3...4 [12]. При наличии воды ($W \neq 0$) мнимая часть $\tilde{\varepsilon}$ вырастает, что определяет эффект поглощения радиоволн. На мнимую часть КДП влияет также и наличие солей в растворе.

Зависимость КДП воды от температуры и длины зондирующей радиоволны λ, см определяется формулой Дебая [9]:

$$\tilde{\varepsilon}_{\text{w}} = 5 + \frac{\varepsilon_{\text{S}} - 5}{1 + i\,\lambda_{\text{S}}/\lambda} - i60\lambda\rho, \qquad (2)$$

где

$$\varepsilon_{\text{S}} = 88 - 0.4\text{T} + 8\cdot 10^{-4}T^2,$$

$$\lambda_{\text{S}} = 1.9 - 0.0026T + 1.45\text{e}^{-0.063\text{T}}.$$

(Согласно [2] формула Дебая справедлива для значений солености до 50 ‰, что значительно превышает значения, используемые здесь).

Величина ρ, г/см^3) в формуле (2) связана с концентрацией растворенных в воде солей S соотношением

$$\rho = S(85 + 3.4T). \qquad (3)$$

Используя обозначения диэлектрической проницаемости для сухой почвы (ε_0 = 4 — суглинок), и

© И. А. КАЛМЫКОВ, А. Г. БОЕВ, В. Б. ЕФИМОВ, 2002



Рис. 1. Зависимость отношения мнимой части КДП к действительной от влажности при различных значениях солености для зондирующей волны $\lambda = 3.1$ см и $T = 15$ °С: *1* — 0.001 ‰, *2* — 0.01 ‰, *3* — 0.05 ‰

выражения (2) для ε_W КДП почвы (1) можно представить в виде:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - i\sigma,$$
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + (\varepsilon_0 - 1)\varepsilon_W W, \qquad (4)$$
$$\sigma = (\varepsilon_0 - 1)W\sigma_W,$$

где

$$\varepsilon_W = \varepsilon_0 + (\varepsilon_0 - 1)\left[5 + \frac{\varepsilon_S - 5}{1 + (\lambda_S/\lambda)^2}\right]W,$$
$$\sigma_W = \left[(\varepsilon_0 - 1)\frac{(\varepsilon_S - 5)}{1 + (\lambda_S/\lambda)^2}\left(\frac{\lambda_S}{\lambda}\right) + 60\lambda\rho\right]W. \qquad (5)$$

Атмосферные осадки представляют собой слабые растворы солей. Общая средняя соленость для типичных дождевых осадков изменяется в среднем от 10 до 30 мг/л (0.01—0.03 ‰). Крайние значения минерализации при этом составляют соответственно 3—4 и 50—60 мг/л [2]. На рис. 1 приведена зависимость отношения мнимой части КДП к действительной от влажности при максимальных и минимальных значениях солености для зондирующей волны $\lambda = 3.1$ см и $T = 15$ °С.

Из приведенных зависимостей следует:

1. Для типичных осадков изменение концентрации солей S приводит к значительному изменению комплексной диэлектрической проницаемости почвы (в 4—5 раз).

2. При указанных значениях солености почва обладает большой проводимостью ($\sigma \gg \varepsilon$).

3. Зависимость отношения мнимой части к вещественной от влажности пропорциональна в диапазоне до 40 % и практически постоянна при большой влажности.

4. Положительные значения температуры увеличивают влияние солености. При отрицательной температуре роль ее сводится к уменьшению солености, например для $T = -10$ °С, характерной для полярных льдов, влияние солености уменьшено по сравнению с обычными условиями почти в три раза.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ НЕРОВНОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Как известно [1, 2, 9, 12], на отраженный поверхностью радиолокационный сигнал влияет целый ряд факторов. Это рельеф местности, состояние растительного покрова, условия радиолокационной съемки, тип почвы, ее влажность и многое другое. Обобщенным показателем интенсивности отражения радиолокационного сигнала являются удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) σ_0. В нашем случае зондирование проводилось в условиях неразвитой растительности, и основной вклад в рассеяние давал поверхностный слой почвы.

Поверхностное рассеяние радиолокационного сигнала обуславливается изменением диэлектрических свойств вещества на границе двух сред. В силу практической неизменности диэлектрической проницаемости ε воздуха рассеяние радиоволн почвой без растительности рассмотрим как рассеяние статистически шероховатой поверхностью.

Пространственный спектр высот суши может сильно зависеть от участка рассматриваемой поверхности, иметь максимумы на различных волновых числах. Это приводит к определенной специфике задачи рассеяния радиоволн на поверхности суши.

Возвышения поверхности разных масштабов играют различную роль в формировании рассеянного радиосигнала, поэтому в пространственном спектре высот поверхности можно выделить три интервала, границы которых зависят от волнового числа — зондирующей радиоволны k_E, ее угла падения — Θ, высоты неровностей h и характерного масштаба L элемента разрешения:

1) $k > k_E, \quad k_f = [k_E \cos^3\Theta / h(x)]^{1/2}, \qquad (6)$

2) $L^{-1} < k < k_f, \qquad (7)$

3) $k < L^{-1}, \qquad (8)$

Коротковолновый интервал (6) ответственен за резонансное рассеяние радиоволн, граничное значение k_f соответствует минимальному масштабу возвышения, отражение от которого можно рассматривать как от плоскости [1].

Неровности с волновыми масштабами из интервала (7) отражают радиоволны как наклонные плоскости, создавая на входе приемной антенны сигнал, усредненный по площади облученного пятна с масштабом L. При случайном распределении углов наклонов таких неровностей, расположенных на горизонтальной плоскости, на выходе приемной антенны будет наблюдаться сигнал, отраженный от плоскости под углом:

$$\gamma = \sqrt{\overline{(\nabla h)^2}}, \qquad (9)$$

где черта означает усреднение.

Неровности с волновыми векторами из интервала (8) также отражают как наклонные плоскости. Однако отраженный сигнал не учитывает самоусреднения сигнала по площади облученного пятна. Поэтому отражение от возвышения такого масштаба происходит как от плоскости, наклонной в месте отражения под локальным углом

$$\psi = |\overline{\nabla} h|. \qquad (10)$$

Наличие возвышений (или углублений) с масштабами (10) есть специфическая деталь в задаче отражения от суши. Для типичной задачи отражения от морской поверхности характерно наличие двух интервалов (7) и (8), так как масштаб облученного пятна обычно много больше длин морских волн. Таким образом, в отличие от морской поверхности, описываемой в задаче радиолокационного рассеяния двухмасштабной моделью неровностей (интервалы (7) и (8)), поверхность суши должна описываться уже трехмасштабной моделью.

Описанная выше трехмасштабная модель неровной рассеивающей поверхности может быть сведена к более простой модифицируемой двухмасштабной модели путем перехода в новую систему координат [1].

Рассмотрим местность с рельефом, который может быть описан некоторой поверхностью C, с масштабом из интервала (8), с наложенными на нее отклонениями высоты (глубины):

$$[\delta] \ll \rho,$$

где ρ — наименьший радиус кривизны поверхности C. Такую местность в дальнейшем будем называть равнинной. Дальнейшее рассмотрение (для простоты) проведем для случая цилиндрической поверхности, образующая которой есть плоская кривая C, заданная естественным параметрическим уравнением

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0(s),$$

где $\mathbf{r}\{x, y\}$ — радиус-вектор, s — длина дуги кривой. Введем в рассмотрение криволинейную систему координат s, η, связанную с кривой C. Координата s отсчитывается вдоль поверхности, координата η отсчитывается от нормали $\mathbf{n}$, восстановленной к кривой в точке s. Тогда положение любой точки M, лежащей вне кривой C, будет задаваться радиусом-вектором:

$$\mathbf{r}(s, \eta) = \mathbf{r}_0(s) + \eta\mathbf{n}.$$

Направляющие вектора новой системы координат

$$\mathbf{a}_1 = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} = \tau\left(1 + \frac{\eta}{R}\right),$$

$$\mathbf{a}_2 = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} = \mathbf{n}$$

будут по направлению совпадать с направлением касательной τ и нормалью $\mathbf{n}$. Расстояние между двумя близкими точками криволинейной системы координат (s, η) равно:

$$d\sigma^2 = d\mathbf{r}^2 = \left(1 + \frac{\eta}{R}\right)^2 ds^2 + d\eta^2.$$

Видно, что если координата η, характеризующая отклонение высоты рельефа по поверхности C, мала по сравнению с радиусом кривизны, т. е.

$$\eta \approx \delta \ll \rho,$$

то $d\sigma^2 \approx ds^2 + d\eta^2$.

По виду это есть элемент длины в декартовой системе координат. Таким образом, для равнинной местности описание задачи рассеяния может быть проведено в локальной декартовой системе координат, образованной касательной и нормалью в точке падения радиоволны.

Комплексная диэлектрическая проницаемость грунта является достаточно большой по величине, поэтому приближенные краевые условия Леонтовича [1] на поверхности грунта можно считать выполненными. Это подтверждают данные, содержащиеся в [6]. При этом матрица УЭПР определяется как

$$\sigma^{P_0}_{P_i P_j} = \langle E^{P_0}_{P_i} E^{*P_0}_{P_j} \rangle R^2 / S (E^{P_0}_0)^2, \qquad (11)$$

где S — площадь облучаемой поверхности, R — расстояние до излучателя, $E^{P_0}_0 = (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{P}_0)$ — напряженность электрического поля падающей волны, $\mathbf{P}_0$, $\mathbf{P}_i$ — векторы поляризации падающей и рассеянной волн. Скобки в (11) означают усреднение по углам наклона крупных неоднородностей с масштабами из интервала (7).

Если $i = j$ и вектор $\mathbf{P}_0$ параллелен $\mathbf{P}_i$, то принимаемое излучение обладает той же поляризацией, что и падающее. Если $i = j$ и $\mathbf{P}_0 \perp \mathbf{P}_i$, то принимается излучение с поляризацией ортогональной поляризации падающей волны. Элементы матрицы УЭПР при $i \neq j$ определяют взаимную корреляцию компонентов рассеянного излучения с ортогональными поляризациями.

Окончательное выражение для матрицы УЭПР имеет следующий вид [1]:

$$\sigma^{P_0}_{P_i P_j} = \left\langle \frac{2(k_E l)^2 (k_e \bar{h})^2}{\pi} \Phi^{P_0}_{P_i P_j} G(q_\perp) \right\rangle. \qquad (12)$$

$$\Phi^{P_0}_{P_i \cdot P_j} = \left[\left(\frac{a}{a+b}\right)^2 (\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_i) + 2(\tilde{\varepsilon} - 1) \frac{a^2}{(b + a\tilde{\varepsilon})(a+b)} (\mathbf{n}P_i)(\mathbf{n}\mathbf{P}_0) \right] \times \left[\left(\frac{a}{a+b}\right)^2 (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_0) + 2(\tilde{\varepsilon} - 1) \frac{a^2 b}{(b + a\tilde{\varepsilon})(a+b)} (\mathbf{n}\mathbf{P}_j)(\mathbf{n}\mathbf{P}_0) \right]. \qquad (13)$$

Здесь $\bar{h}$, l — соответственно средняя квадратичная

высота и масштаб корреляции мелких неоднородностей (интервал (6)), $G(q_\perp)$ — их спектральная плотность высот, $q_\perp$ — проекция вектора рассеяния на плоскость, касательную к поверхности); a — проекция нормали к поверхности на направление обзора, $b = \sqrt{\tilde{\varepsilon} - 1 + a^2}$.

Для случая вертикальной поляризации падающей и отраженной волны, используемых в РБО ИСЗ «Січ-1»:

$$(\mathbf{P}_0\mathbf{P}_i) = (\mathbf{P}_0\mathbf{P}_j) = 1, \quad (\mathbf{n}\mathbf{P}_i) = (\mathbf{n}\mathbf{P}_j) = (\mathbf{n}\mathbf{P}_0)$$

из (12) и (13) получаем

$$\Phi_\perp = \left| \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 + \frac{2(\tilde{\varepsilon} - 1)a^2 b}{(b + a\tilde{\varepsilon})(a+b)} (\mathbf{n}\mathbf{P}_0)^2 \right| \qquad (14)$$

и

$$\sigma_\perp = \left\langle \frac{2(kl)^2(kh)^2}{\pi} \left| \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 + \frac{2(\varepsilon - 1)a^2 b(\mathbf{n}\mathbf{P}_0)^2}{(b + a\varepsilon)(a+b)} \right| G(q_\perp) \right\rangle. \qquad (15)$$

В формулу (15) входит комплексная диэлектрическая проницаемость $\tilde{\varepsilon}$ почвы, неизвестные величины a спектр шероховатостей $G(q_\perp)$, масштабы l, h.

При известном из эксперимента значении $\sigma_\perp$ уравнение (15) будет представлять собой одно уравнение со многими неизвестными, что не позволит определить из него значение диэлектрической проницаемости почвы.

С целью уменьшения произвола, рассмотрим логарифмический радиолокационный контраст (в дальнейшем — контраст):

$$\tilde{K}_\perp(\mathbf{r}, \lambda, \theta) = 10\lg \frac{\sigma_\perp}{\sigma_\perp^{(0)}}. \qquad (16)$$

Здесь и далее индексом «0» будут обозначаться величины, относящиеся к сухой почве. Аргументы r, Θ, λ в левой части (16) обозначают, что контраст строится для одной и той же точки r облучаемой площадки одних и тех же углов падения Θ, азимутального угла и длины зондирующих радиоволн. В итоге из (15) и (16) получаем:

$$\tilde{K}_\perp(r, \lambda, \Theta) = 10\lg \frac{\left\langle \left| \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 + \frac{2(\varepsilon - 1)a^2 b}{(b + a\tilde{\varepsilon})} \frac{(\mathbf{P}_0\mathbf{n})^2}{(a + bt)} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 + \frac{2(\varepsilon_0 - 1)a^2 b}{(b_0 + a\tilde{\varepsilon})} \frac{(\mathbf{P}_0\mathbf{n})^2}{(a + b_0)} \right|^2 \right\rangle}. \qquad (17)$$

В этой формуле выражение в числителе и знаменателе под знаком логарифма различаются лишь КДП влажной и сухой почв, что позволяет упростить вычисление контраста.

Усреднение в (17) по углам наклона крупных неоднородностей в пределах облучаемой площадки, производимое приемником, эквивалентно интегрированию σ по всем возможным углам с некоторой, функцией их распределения. Поэтому усредненные выражения в (17) можно найти с помощью теоремы о среднем [1].

При этом для контраста получим следующее выражение:

$$\tilde{K}_\perp(\tilde{r}, \lambda, \Theta + \psi + \gamma) = 10\lg \frac{\left| \left(\frac{a_\gamma}{a_\gamma + b}\right)^2 + 2(\tilde{\varepsilon} - 1) \frac{a_\gamma^2 b \sin^2(\Theta + \psi + \gamma)}{(b + a\varepsilon)(a+b)} \right|^2}{\left| \frac{a_\gamma}{a_\gamma + b_0} + 2(\tilde{\varepsilon} - 1) \frac{a_\gamma^2 b_0 \sin^2(\Theta + \psi + \gamma)}{(b_0 + a\varepsilon_0)(a + b_0} \right|^2}, \qquad (18)$$

где γ — средний квадратичный угол наклона неровностей,

$$a_\gamma = \cos(\Theta + \psi + \gamma),$$
$$b = \sqrt{\tilde{\varepsilon} - 1 + \cos^2(\Theta + \psi + \gamma)},$$
$$b_0 = \sqrt{\varepsilon_0 - 1 + \cos^2(\Theta + \psi + \gamma)}.$$

Поскольку углы наклона γ и ψ неизвестны и, вообще говоря, различны для различных участков местности, то локальный контраст (18) будет случайной функцией γ и ψ. Кроме того, $\tilde{K}_\perp$ является также случайной функцией диэлектрической проницаемости сухой почвы ε_0, интенсивности осадков и солености. Учитывая, что зондируемая местность — равнинная, упростим выражение для контраста (18), оставив в выражениях для a_γ и b, b_0 только угол Θ, т. е.

$$a_\gamma \approx \cos\Theta,$$
$$b \approx \sqrt{\tilde{\varepsilon} - 1 + \cos^2\Theta}, \qquad b_0 \approx \sqrt{\varepsilon_0 - 1 + \cos^2\Theta}.$$

Контраст (18) является локальным и может быть использован для восстановления параметров почвы на участке с размерами, определяемом элементом разрешения РБО (0.8×1.2 км).

Вместе с тем такая детальная информация на практике нужна не всегда. Усредняя дополнительный локальный контраст на большом участке местности D:

$$\overline{K}_\perp(\lambda, \Theta) = \frac{1}{D} \int K(\mathbf{r}, \lambda, \Theta) dxdy,$$

получим интегральный контраст, который будет характеризовать лишь средние параметры почвы:

$$K_\perp(\lambda, \Theta) = 10\lg \frac{\left| \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 + 2(\varepsilon - 1) \frac{a^2 b \sin^2\Theta}{(b + a\varepsilon)(a+b)} \right|^2}{\left| \left(\frac{a}{a+b_0}\right)^2 + 2(\varepsilon_0 - 1) \frac{a^2 b_0 \sin^2\Theta}{(b_0 + a\varepsilon_0)(a+b_0)} \right|^2}. \qquad (19)$$

Здесь все величины вычисляются для угла падения радиоволны Θ и неких средних значений ε и ε_0.

Масштаб участка усреднения может быть выбран путем рассмотрения экспериментально полученных кривых локальных ЭПР и построенных по ним кривой локального контраста.

Средний контраст (19) есть функция угла падения Θ, длины зондирующей радиоволны λ, влажности W, температуры T и солености S поверхностного слоя почвы.

Общее представление о поведении контраста при изменении этих величин дают рис. 2, 3.

Видно, что изменение контраста при типичных значениях параметров S, W составляет 3—8 дБ и слабо зависит от температуры почвы.

Для заданных из эксперимента значениях λ, Θ, T и значения контраста выражение (19) будет представлять собой одно уравнение для определения двух неизвестных величин — влажности и солености.

Поэтому для их определения необходимо планировать либо двухчастотное одновременное зондирование одной и той же местности, либо зондирование ее под разными углами падения. Данные ИСЗ «Січ-1» позволяют осуществить вторую возможность.

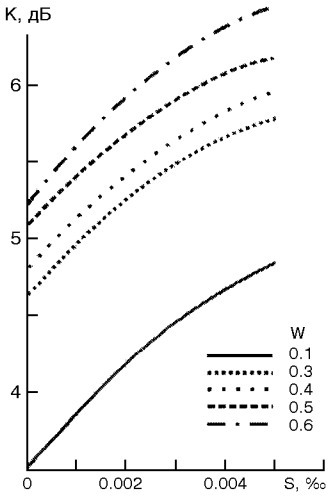


Рис. 2. Зависимость контраста K от солености S при различных значениях влажности W; $T = 14°$, $\lambda = 3.1$ см, $\Theta = 40°$

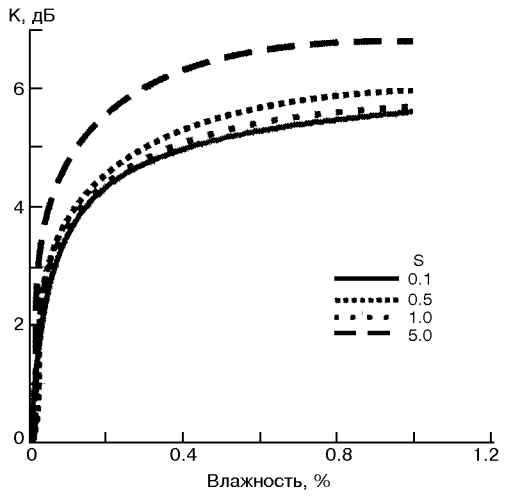


Рис. 3. Зависимость контраста K от влажности W при различных значениях солености S; $T = 14°$, $\lambda = 3.1$ см, $\Theta = 40°$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Радиолокационная съемка, данные которой используются в настоящей роботе, проводилась на территории Украины в апреле — мае 1996 г.

Для уменьшения влияния рельефных неоднородностей на территории Запорожской области был выбран участок с координатами 50°—46° северной широты и 30°—38° восточной долготы. Данный участок характеризуется как равнина с практически полностью отсутствующими лесными массивами и естественной степной растительностью [6]. Согласно топографическим картам средняя высота его неровностей не превышает 100 м над уровнем моря, а неровности имеют наклон около 1 % (порядка 0.5°). Почвы в основном суглинистые, местами глинистые и песчаные.

Радиолокатор бокового обзора (РБО) ИСЗ «Січ-1» имел полосу обзора около 500 км, углы падения радиоволн на поверхность Земли изменяются при этом от 20 до 50°.

Одна и та же точка местности попадала в полосу обзора каждые 8 ч, и наблюдалась в течение 10 витков спутника вокруг Земли под разными углами падения и различными азимутами. Через одну и ту же подспутниковую точку спутник пролетал раз в трое суток. Картина обзора одной и той же местности повторялась при этом полностью.

Первая радиолокационная съемка выбранного участка местности (рис. 4, *а*) производилась 23 апреля 1996 г. По данным контактных измерений сети Гидрометеоцентра [3] с 18 по 25 апреля 1996 г. в южной части Украины полностью отсутствовали любые проявления осадков. Среднесуточная температура в этот период составляла 14 °С. Вторая радиолокационная съемка производилась 26 апреля 1996 г. (рис. 4, *б*). Режимы радиолокационной съемки и параметры спутниковой системы были идентичны во время обоих радиолокационных съемок.

По данным Гидрометеоцентра 26 апреля в первой половине дня в южной части Украины прошли кратковременные ливневые дожди. Наличие насыщенной влагонесущей облачности подтвердили данные оптической спутниковой съемки, проведенной

Рис. 4. Радиолокационные изображения исследуемого района, полученные РБО ИСЗ «Січ-1»: *а* — 23.04.96 г., *б* — 26.04.96 г. В верхнем углу выделены увеличенные изображения исследуемого района. Стрелками обозначены направления сечения

26 апреля в 11:30 местного времени ИСЗ NOAA-14, а наличие зон пониженной температуры на поверхности подтверждаются данными инфракрасной съемки, проведенной синхронно с оптическими измерениями. Элемент разрешения в режимах оптической и инфракрасной съемок составлял 2 км, что соизмеримо с элементом разрешения при радиолокационной съемке (около 0.8 км). Вся полученная информация (оптическая, инфракрасная и радиолокационная) была приведена нами к одному масштабу, и совмещена между собой. Участок с влагонесущей облачностью и зона пониженной температуры на поверхности почвы совпали с зоной повышенной отражаемости на радиолокационном изображении. На рис. 4 эта зона выделена и характеризуется повышенной яркостью, что особенно заметно на увеличенном фрагменте в верхней части рисунка. В отсутствие осадков выделенный квадратом район характеризуется более слабой и относительно однородной отражаемой способностью. Темная полоса на изображениях соответствует Каховскому водохранилищу.

Для определения влажности почвы экспериментально определялась интенсивность отраженного от поверхности радиосигнала и находилась удельная эффективная площадь рассеяния УЭПР в каждой точке выбранного разреза изображений на рис. 4 (отмечены стрелками). Как 23, так и 26 апреля выбранное сечение просматривалось на различных витках ИСЗ под двумя углами падения $\Theta_1 = 40°$, $\Theta_2 = 28°$. Азимутальные углы, соответствующие углам падения, были также различны и составляли соответственно $\beta_1 = 20°$, $\beta_2 = 50°$.

Для исключения неизвестного спектра неоднородностей резонансно рассеивающих радиоволн для каждой точки X разреза строились радиолокационные контрасты:

$$K_1(\Theta_1, x) = 10\lg \frac{\sigma_w^0(\Theta_1; x)}{\sigma_0^0(\Theta_1; x)}; \qquad \beta = 20°, \qquad (20)$$

$$K_2(\Theta_2, x) = 10\lg \frac{\sigma_w^0(\Theta_2; x)}{\sigma_0^0(\Theta_2; x)}; \qquad \beta = 50°, \qquad (21)$$

где σ_w^0 и σ_0^0 — соответственно УЭПР после выпадения осадков и до них. Контрасты (20) и (21) явно не зависят от азимутального угла β, однако от него, вообще говоря, зависит рельеф плавных неоднородностей в рассматриваемом сечении. Для исключения влияния этого неизвестного фактора, а также других, например неоднородности интенсивности дождя, было проведено усреднение контрастов по сечению:

$$\overline{K}(\Theta) = \frac{1}{L}\int_0^x K(\Theta, x)dx,$$

где L — длина выделенного сечения.



Рис. 5. Зависимости σ_w^0 (сплошная кривая), σ_0^0 (штриховая) (а.) и радиолокационного контраста K (б) от координаты x в выбранном сечении; $\Theta = 40°, \beta = 20°$

На рис. 5 представлены зависимости σ_w^0, σ_0^0 (рис. 5, *а*) и контраста K_1 (рис. 5, *б*) от координаты x в выбранном сечении. Там же (пунктир) приведен и средний контраст для угла падения $\Theta_1 = 40°$. Видно, что контрасты изменяются достаточно сильно по сечению, достигая величины $K_{max} \approx 6$ дБ, величина среднего контраста составляет

$$\overline{K_1} = 5.4 \text{ дБ}. \quad (23)$$

Аналогично ведет себя и контраст для сечения $\Theta_2 = 28°$, средний контраст в этом случае равен

$$\overline{K_2} = 4.9 \text{ дБ}. \quad (24)$$

Характерный пространственный масштаб изменения K вдоль сечения составляет величину порядка 10 км, ошибка в определении K, связанная с экспериментальными погрешностями не превышает 2...3 %.

Экспериментально найденные значения средних контрастов (23) и (24) и выражения для них из (19) дали при заданной температуре и длине радиоволны два уравнения для определения относительной влажности и солености поверхностного слоя почвы, численные решения которых привело к значениям

$$W = 0.38, \quad S = 1.4 \text{ ‰} \quad (25)$$

На рис. 6 этому решению соответствуют точки пересечения контрастов K_1 и K_2. Численный анализ уравнений показал, что найденное решения (25) единственное. Вычисления показывают, что изменение температуры почвы в диапазоне 10...20 °С практически не существенно. Экспериментальные погрешности определения контраста изменяют значения влажности и солености не более чем на 2...5 %.

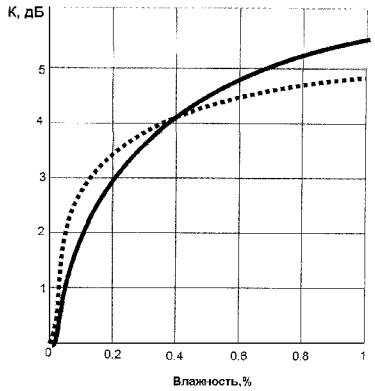


Рис. 6. Зависимость контрастов K_1 и K_2 от влажности W при значении солености $S = 1.4‰$; $T = 14°$, $\lambda = 3.1$ см

Значения последождевой влажности, полученные контактным методом в четырех точках исследуемого района, согласно данным Гидрометеоцентра [3] равны: 0.31, 0.4, 0.23, 0.52.

Средняя влажность при этом равна $W = 0.3625$, что достаточно хорошо совпадает с данными радиолокационного зондирования.

Такое совпадение теоретических и экспериментальных результатов с данными контактных измерений делает возможным использование методики определения количества свежевыпавших осадков в практических условиях.

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972.— 424 с.
2. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985.—352 с.

3. Кольцевые карты погоды и количества выпавших осадков в виде изогиет. — Киев: Украинский ГМЦ, 1996.—Вып. 27.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988.—350 с.
5. Ландгребе Д. А. Дистанционное зондирование — количественный подход. — М.: Недра, 1983.—415 с.
6. Почвенный атлас СССР. — М.: ГУГК при Совете Министров СССР, 1983.—487 с.
7. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. радио, 1980.—264 с.
8. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990.—198 с.
9. Реутов Е. А., Шутко А. М. Определение влагосодержания почвогрунтов СВЧ-радиометрическим методом с привлечением априорой информации // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 1.—С. 73—87.
10. Фукс И. М., Ямпольский Ю. М. Связь радиолокационного контраста с влажностью грунта // Тез. докл. XVI Всесоюз. конф. по распространению радиоволн (Харьков, октябрь 1990). — Харьков, 1990.—Ч.II.—С. 236—237.
11. Хипп Дж.Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты // ТИИЭР.—1974.—62.—С. 122—128.
12. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. — М.: Наука, 1986.—188 с.
13. CEOS Yearbook. Smith system engineering limited. — UK.—145 p.
14. Dranovsky V. I., Yefimov V. B., Kalmykov I. A., et al. Possibilities of Ecological Environment Monitoring the Using «Sich-1» spacecraft // Proc. Fourth Ukraine-China symp. of space science and technology. — Kiev, 1996.—P. 4—7.
15. ESA Yearbook. — McGraw-Hill, 1998.—256 p.