

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ
ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ ТА КОСМОС – СУСПІЛЬСТВУ

Праці Першої наукової конференції
Київ, 25–27 червня 2007 р.

КИЇВ 2007

ЗМІСТ

Лялько В. І., Оголенко В. С. Про науково-прикладну програму використання даних в результаті експлуатації космічного апарату «Січ-2»

Станкевич С. А., Шолоник О. В. Адаптивне многомерне вероятностное преобразование многоспектральних цифровых аэрокосмических снимков

Лялько В. І., Вульфсон Л. Д., Котляр А. Л., Рябоконенко А. Д., Фрейлихер В. Д. Подповерхнове зондированиe в P-диапазоне с целью определения влажности почвы в различных ландшафтно-климатических условиях

Теременко О. М., Мичак А. Г., Кудряшов О. І., Кудряшова Я. Л. Використання космічної інформації для вирішення водоохоронних завдань міських територій (на прикладі м. Києва)

Кушнір В. М., Станічний С. В., Чурилова Т. Я. Использование мультиспектральных космических изображений для изучения экологического состояния северо-западной части Черного моря

Ратнер Ю. Б., Іванчик М. В., Баянкина Т. М., Плотников Е. В., Холод А. Л. Многокомпонентная система диагностики и прогноза динамики Черного моря

Козлова А. О. До оцінювання та картування видового багатства за багатоспектральними даними дистанційного зондування Землі

Макаренко В., Рюкер Г., Соммер Р., Джанібеков Н., Штрунц Г., Колодязний О. Генетичний алгоритм в геоінформаційному середовищі для підтримки реструктуризації землекористування та управління

Федоровский А. Д., Козлов З. В., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. Комплексное использование космической информации дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений для прогнозной оценки залежей углеводородов

Ліщенко Л. П. Застосування ландшафтно-системного підходу та аерокосмічної інформації до оцінювання геоекологічного стану гірничопромислових територій

Бусигін Б. С., Нікулін С. Л., Бойко В. О. Применение ГИС РАПИД для прогнозирования золоторудной минерализации по материалам космических съемок

Архипов А. И., Товстюк З. М., Лялько В. И., Попов М. А., Архипова Т. А., Левчик Е. И., Осканьян Т. В. Методические принципы поиска залежей углеводородов на суше с использованием аэрокосмической информации

Пазинич Н. В. Геоморфологічні дослідження на основі матеріалів дистанційного зондування Землі при створенні Держгеолкарти-200

CONTENTS

- 5 Lalko V. I., Oholenko V. S. On the scientific-applied program for the use of «Sich-2» satellite data
- 11 Stankevich S. A., Sholonik O. V. Adaptive multidimensional probabilistic transformation for multispectral digital aerospace images
- 15 Lyalko V. I., Wulfson L. D., Kotlar A. L., Ryabokonenko A. D., Freilicher V. D. Subsurface remote sensing in the P-band for the determination of soil water content in different landscape and climatic conditions
- 19 Teremenko O. M., Mychak A. G., Kudriashov O. I., Kudriashova Ya. L. The use of space information for the decision of water-protection problems of city territories
- 22 Kushnir V. M., Stanichny S. V., Churilova T. Ya. Use of multispectral space images for the study of the ecological status of the Black Sea north-west part
- 26 Ratner Yu. B., Ivanchik M. V., Bayankina T. M., Plotnikov E. V., Holod A. L. Multicomponent system for Black Sea dynamic processes diagnoses and prediction
- 29 Kozlova A. O. To the estimation and mapping of species richness from multispectral remote sensing data
- 33 Makarenko V., Ruecker G., Sommer R., Djanibekov N., Strunz G., Kolodyazhny O. GIS-based genetic algorithm optimization tool for supporting land use and land management restructuring
- 38 Fedorovsky O. D., Kozlov Z. V., Sukhanov K. Yu., Yakimchuk V. G. Integrated utilization of remote sensing information and ground-based observations to predictive estimation of hydrocarbon accumulations
- 41 Lischenko L. P. Substantiation of environmental assessment of mining territories through landscape system approach and remote sensing data
- 47 Busygin B. S., Nikulin S. L., Boyko V. O. The use of RAPID GIS for gold mineralization prediction on the basis of satellite data
- 55 Arkhipov A. I., Tovstyuk Z. M., Lyalko V. I., Popov M. A., Arkhipova T. A., Levchik E. I., Oskan'yan T. V. Remote sensing based methodology for onshore hydrocarbons field acquisition
- 61 Pazynych N. V. Geomorphologic investigation on the basis of remote sensing data in the elaboration of the State Geomap-200

ISBN 978-966-02-4740-6

© Національна академія наук України, 2007
© Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук, 2007
© Головна астрономічна обсерваторія, 2007

- Мичак А. Г., Філіпович В. Є. Методичні засади використання даних ДЗЗ при створенні Державної геологічної карти нового покоління (ГДП-200)
- Сытник О. В., Ефимов В. Б., Цымбал В. Н., Кабанов А. В. Метод объединения данных многочастотных систем дистанционного зондирования Земли
- Ефимов В. Б., Курекин А. С., Сытник О. В., Цымбал В. Н., Гавриленко А. С., Кабанов А. В. Обзорная радиолокационная система дистанционного зондирования Земли с повышенным азимутальным разрешением
- Сытник О. В., Ефимов В. Б., Цымбал В. Н., Кабанов А. В. Динамическая адаптивная коррекция радиолокационных изображений
- Нестеренко Г. В., Шелковенков Д. А., Иванова Е. А., Бондарь Е. Ю. О возможности обеспечения автономной высокоточной синхронизации шкал времен (частоты) разнесенных хранителей по сигналам внешних источников
- Кудашев Е. Б., Филонов А. Н. Распределенный доступ и поиск данных дистанционного зондирования Земли из космоса
- Черногор Л. Ф. Физика и экология системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера
- Логинов А. А., Ткаченко В. А., Черемных О. К. О гидродинамическом механизме смены фаз динамо-цикла Солнца
- Лозицкий В. Г. Магнитные поля в солнечных вспышках
- Лозицкая Н. И., Малащук В. М., Степанян Н. Н. Результаты исследования быстрых изменений магнитного поля солнечного пятна по данным одновременных измерений в КАО и КрАО
- Токий В. В., Ефименко В. М., Токий Н. В. Возмущения, вызванные горизонтальными приливными силами в экваториальной плоскости солнечной короны
- Кришталь А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д. Мелкомасштабные неустойчивости в предвспышечной плазме петель в активной области на Солнце
- Костык Р. И. Волновые движения в необычном образовании солнечной атмосферы
- Колесник Ю. Л., Шахов Б. О. Поширення космічних променів у просторово-неоднорідному міжпланетному розсіювальному середовищі
- 64** Mychak A. H., Filipovich V. Ye. Methodical principles for the use of data of remote sensing of the Earth for the development of the STSTE geological map
- 67** Sytnik O. V., Efimov V. B., Tsymbal V. N., Kabanov A. V. The merge information method for multifrequency systems of remote sensing of the Earth
- 71** Efimov V. B., Kurekin A. S., Sytnik O. V., Tsymbal V. N., Gavrilenko A. S., Kabanov A. V. Surveying radar system for the remote sensing of the Earth with enhanced azimuthal resolution
- 74** Sytnik O. V., Efimov V. B., Tsymbal V. N., Kabanov A. V. Dynamic adaptive correction of radar-tracking images
- 78** Nesterenko G. V., Shelkovenkov D. A., Ivanova E. A., Bondar E. Yu. On the possibility of provision of autonomous high-accuracy synchronization of time scales (frequency) of space-apart keepers on the basis of external source signals
- 80** Kudashev E. B., Filonov A. N. Distributed access and search for the satellite data of remote sensing
- 86** Chernogor L. F. Physics and ecology of the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system
- 93** Loginov A. A., Tkachenko V. A., Cheremnykh O. K. On hydrodynamic mechanism of phase change of the Sun's dynamo-cycle
- 99** Lozitsky V. G. Magnetic fields in solar flares
- 101** Lozitska N. I., Malashchuk V. M., Stepanyan N. N. Results of the investigation of fast magnetic field oscillations in a sunspot on the basis of simultaneous measurements in the Kyiv and Crimea observatories
- 105** Tokiy V. V., Efimenko V. M., Tokiy N. V. Disturbances caused by horizontal tidal forces in the equatorial plane of the solar corona
- 109** Kryshtal A. N., Gerasimenko S. V., Vojtsekhovskaya A. D. Small-scale instabilities in the preflare loop plasmas in active regions
- 112** Kostik R. I. Wave motions in an extraordinary observed solar phenomenon
- 115** Kolesnyk Yu. L., Shakhov B. A. Cosmic ray propagation in the spatially inhomogeneous interplanetary scattering medium

Наукове видання

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ
ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ**

НАУКИ ПРО КОСМОС І ЗЕМЛЮ — СУСПІЛЬСТВУ

**Праці Першої наукової конференції
(Київ, 25—27 червня 2007 р.)**

Підп. до друку 12.12.07. Формат 84×108/16. Папір офс. № 1. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 12.39. Обл.-вид. арк. 11.8 Тираж 125 екз. № замовлення

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

РІШЕННЯ

Першої наукової конференції

«Науки про Землю та космос — суспільству»

Перша наукова конференція «Науки про Землю та космос — суспільству», що проходила з 25 по 27 червня 2007 року на базі Національного авіаційного університету, зібрала більш як сто представників понад 40 організацій і стала значним форумом провідних вітчизняних фахівців з геокосмічних досліджень, зокрема фізики Сонця, навколоземного та міжпланетного простору, фізики океану та атмосфери, геологічних наук та дистанційного зондування Землі. На двох пленарних засіданнях та п'яти предметних секціях було обговорено поточний стан та ключові проблеми розвитку наук про Землю та космос в Україні, питання міжнародної співпраці, роль відповідних досліджень в забезпечені розвитку суспільства, загальнозначущих наукових та технологічних програм.

За підсумками обговорення учасники конференції вирішили:

Схвалити ініціативу з проведення наукової конференції «Науки про Землю та космос — суспільству» та вважати за доцільне передбачити у майбутньому проведення таких конференцій.

Звернутися з проханням до НАН України про фінансування програми GEOUA, як національного сегменту міжнародних ініціатив з космічних досліджень, зокрема з розбудови Глобальної системи систем спостереження Землі (GEOSS).

Підтримати зусилля щодо відзначення Міжнародного геліофізичного року (IHY) в Україні та визнати за доцільне підготовку відповідних заходів.

Підтримати ініціативу Відділення наук про Землю НАН України з проведення заходів Міжнародного року планети Земля в Україні (IYPE), визначити найбільш актуальні роботи в цьому напрямі, а саме:

- вивчення кліматичної системи та прогнозування кліматичних змін, визначення антропогенної та природної складових глобальних процесів,
- дослідження океану та морських екосистем,
- дослідження ґрунтових вод у контексті безпеки регіонального розвитку та сталого використання водних ресурсів,
- вивчення глибинної будови Землі,
- дослідження ґрунтового покриву та його ролі в функціонуванні геосфери,
- оцінка сталості використання природних ресурсів,
- вивчення та прогнозування розвитку природних катастроф в контексті глобальних змін,
- дослідження економічних та соціальних наслідків глобальних кліматичних та екологічних змін,
- розробка ефективних технологій (в тому числі — аерокосмічних) моніторингу процесів в атмосфері й навколоземному просторі, морях і суходолі.

Рекомендувати Відділенню наук про Землю НАН України розробити конкретну наукову програму проведення заходів IYPE в Україні.

Закликати наукову спільноту приділяти більше уваги суспільному компонентові робіт у галузі наук про Землю та космос та ширше пропагувати результати цих досліджень.

Звернути особливу увагу наукової та освітньої спільноти на вдосконалення підготовки фахівців в галузях наук про Землю та космос, на необхідність підвищити рівень співпраці наукових та освітніх закладів у підготовці молодих вчених.

Схвалити рішення секцій конференції.

Висловити подяку Головній астрономічній обсерваторії НАН України, Науковому центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Національному авіаційному університету за організацію конференції та активну участь у її проведенні.

Київ, 27 червня 2007 року

УДК 528.8.04:504.064.3] (477) КП 04778363

В. І. Лялько, В. С. Оголенко

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ
E-mail: casre@casre.kiev.ua

Про науково-прикладну програму використання даних в результаті експлуатації космічного апарату «Січ-2»

Представлено 25.06.07

Розглядаються основні елементи та структурні особливості розробленої науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2», що є складовою частиною цільового проекту «Зондування» З(Н)КПУ на 2003—2007 рр., який виконувався Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ в рамках Державного контракту з НКАУ.

За роки виконання Першої (1993—1997) та Другої (1998—2002) космічних програм України в рамках цільового проекту «Зондування», що виконувався з метою забезпечення науково-методичного супроводу робіт з ДЗЗ шляхом розробки та виконання наукових програм для космічних апаратів «Січ-1» та «Океан-О», створення нових методик та комп’ютерних технологій тематичної інтерпретації космознімків, було вирішено цілий ряд актуальних для України природоресурсних та природоохоронних задач (пошуки нафтогазових покладів, оцінка впливу Чорнобильської катастрофи на довкілля, контроль екологічного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування врожайності зернових культур, дослідження морів та океанів, синоптичних прогнозів та ін.).

Результати цих досліджень неодноразово доповідались на вітчизняних та міжнародних наукових форумах, знайшли відображення у трьох Атласах тематично дешифрованих космознімків України («Україна з Космосу», 1997, 1999 рр. та «Космос — Україні», 2001 р.), збірниках «Нові методи в аерокосмічному землезнавстві» (1999), «Аерокосмічні дослідження Землі» (2002), монографіях «Інформатизація аерокосмічного землезнавства» (2002) та «Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування» (2006), сотнях статей і були практично впроваджені в організаціях Міністерств екології і природних ресурсів, надзвичайних ситуацій, НАК «Нафтогаз України», держадміністраціях міста Києва і ряду областей України та ін.

При виконанні цільового проекту «Зондування» в

1998—2002 рр. виконано дослідження на основі застосування методу системного аналізу. Проведено системний аналіз апаратурних комплексів ДЗЗ, обґрунтовано методику та розроблено комп’ютерну програму оцінки ефективності апаратурного комплексу «Січ-1М» на основі системних досліджень та імітаційних технологій, виконано оцінку ефективності вирішення тематичних задач науково-прикладної програми ДЗЗ, створено концептуальну модель КС «Січ». Розроблено та узгоджено ТЗ на системний аналіз КС «Січ».

Науково-прикладну програму використання даних КА «Січ-2» (далі — Програма) розроблено згідно з З(Н)КПУ на 2003—2007 роки (цільова програма «Наукові космічні дослідження», напрям «Дослідження Землі та навколоземного простору» та цільова програма «Дистанційне зондування Землі», напрям «Створення та експлуатація системи геоінформаційного космічного забезпечення»).

Космічні експерименти (КЕ) Програми, відповідно до розв’язуваних у процесі їхнього проведення задач науково-методичного і прикладного характеру, цільового призначення та ареалів досліджень, об’єднані у три розділи:

- 1) науково-методичні дослідження;
- 2) прикладне використання даних;
- 3) науково-освітні заходи.

Сучасні супутникові системи ДЗЗ містять у своєму складі прилади зі значним числом спектральних каналів у видимому та інфрачервоному діапазонах, прилади для проведення радіолокаційних і радіометричних вимірювань, що дозволяє проводити дослідження в інтересах широкого кола науково-

вих і господарських задач.

Запуск і експлуатація КА «Січ-2», оснащеного комплексом приладів оптичного діапазону високої просторової розрізненості, дозволить створити систему безперервного забезпечення даними ДЗЗ суб'єктів виробничо-господарської, наукової та управлінської діяльності державного, регіонального і місцевого рівнів, зв'язаних із захистом і контролем навколошнього природного середовища, раціональним використанням природних ресурсів, захистом населення від несприятливих змін погодних умов і клімату.

Серед переліку робіт, які будуть виконані протягом 2003—2007 років, зупинимось більш детально на розробці науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2» (надалі — Програми).

ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ПРОГРАМИ

Основним цільовим призначенням «Науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2» є:

- відпрацювання, апробація, дослідна експлуатація та атестація методик і технологій рішення тематичних задач ДЗЗ і задач моніторингу навколошнього середовища при безпосередньому залученні до участі в космічних експериментах організацій-споживачів космічної інформації;
- підготовлення методик і технологій рішення тематичних задач ДЗЗ до впровадження у виробництво;
- практичне вирішення широкого кола тематичних задач ДЗЗ у конкретних регіонах України на основі використання даних КА «Січ-2» та інших космічних апаратів;
- підготовлення фахівців організацій-споживачів даних ДЗЗ для рішення природоресурсних, екологічних, народногосподарських і інших задач на основі космічної інформації;
- аерокосмічна освіта студентів вищих навчальних закладів України.

Проект Програми розроблено колективом авторів під керівництвом директора Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі НАН України, чл.-кор. НАН України В. І. Лялька.

Основний внесок у розробку проекту Програми зроблено колективами фахівців таких організацій:

- Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) НАН України (наукові керівники: член-кореспондент НАН України В. І. Лялько і член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський);
- Морського гідрофізичного інституту НАН України (науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор Г. К. Коротаєв);

— Інституту космічних досліджень НАНУ та НКАУ (науковий керівник академік НАН України В. М. Кунцевич);

— ДП «Дніпрокосмос» (науковий керівник кандидат технічних наук В. І. Волошин);

— Конструкторського бюро космічних апаратів і космічних систем ДКБ «Південне» НКАУ (науковий керівник авторського колективу головний конструктор космічних апаратів та космічних систем ДКБ «Південне» О. Л. Макаров).

— Державного науково-природничого центру НКАУ — ДНВЦ «Природа» (науковий керівник кандидат геол.-мін. наук В. С. Готинян).

Склад космічних експериментів проекту Програми та їхні організації-виконавці наведені в табл. 1.

Доопрацьована Програма погоджена зі всіма зацікавленими організаціями та Радою з космічних досліджень НАН України; затверджена НАН України і передана на розгляд і затвердження в НКАУ.

У табл. 2 наведені дані про основні характеристики супутника спостереження Землі «Січ-2» та встановленої на ньому наукової апаратури ДЗЗ.

«Січ-2» є супутником дистанційного зондування Землі з оптико-електронними приладами багатозонального спостереження високої роздільної здатності. Це спеціалізований малогабаритний супутник, комплекс оптико-електронної апаратури якого дозволяє вирішувати ряд практичних і наукових завдань регіонального й локального рівня з моніторингу кризових ситуацій, рослинних і ґрунтових покривів суходолу, створення цифрових карт місцевості, керування ресурсами й планування в урбанізованих і прибережних зонах та ін. Споживачами інформації можуть бути: державні відомства, дослідницькі й екологічні організації, агропромислові, геологорозвідувальні, будівельні, транспортні, страхові, туристичні фірми, громадські організації, засоби масової інформації.

ПРОБЛЕМИ, ЩО БУДУТЬ ВИРІШУВАТИСЯ

При виконанні проекту буде вирішено одну з найважливіших проблем — проблему розроблення та виконання науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2».

Нові науково-технічні результати та розробки

Протягом 2003—2007 рр. буде

1. Розроблено «Науково-прикладну програму використання даних КА «Січ-2», розроблено та затвердено Національним космічним агентством України (НКАУ) технічне завдання (ТЗ) на космічні експерименти (КЕ) та Програми КЕ вказаних науково-прикладних програм.

2. З метою забезпечення науково-прикладних

Таблиця 1. Космічні експерименти проекту Програми та їхні виконавці

Назва розділу	Програми і космічного експерименту	Шифр	Постановник
1. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ			
1.1. Відпрацювання методів оцінки екологічного стану ландшафтів України	«Екологія суходолу»		ЦАКДЗ НАНУ
1.2. Відпрацювання методів оцінки стану і прогнозу врожайності озимої пшениці на основі комплексної обробки наземної і космічної інформації	«Прогноз урожаю»		ЦАКДЗ НАНУ
1.3. Відпрацювання методів оцінки екологічного стану водних екотонів (гирлових зон та ін.) на основі ландшафтно-системного підходу	«Вода»		ЦАКДЗ НАНУ
1.4. Відпрацювання методів оцінки впливу геодинамічних факторів на екологічний стан урбанізованих територій	«Місто»		ЦАКДЗ НАНУ
1.5. Відпрацювання методів моніторингу опадів на суходолі з використанням комплексної інформації КА «Січ-2» та КА ENVISAT	«Дощ»		ЦРЗЗ НАНУ та НКАУ
1.6. Відпрацювання методів та супутникової технології пошуків покладів нафти і газу на суходолі	«Нафта та газ суходолу»		ЦАКДЗ НАНУ
1.7. Відпрацювання методів пошуку нафтогазових покладів на шельфи	«Нафта та газ шельфу»		ЦАКДЗ НАНУ
1.8. Відпрацювання методів комплексного моніторингу акваторій Чорного і Азовського морів та морів Середземномор'я	«Катран»		МГІ НАНУ
1.9. Відпрацювання методів зовнішнього контролю параметрів оптичної апаратури ДЗЗ КА «Січ-2»	«Контроль»		ЦАКДЗ НАНУ
1.10. Відпрацювання методів калібрування даних оптичних сенсорів	«Калібрування»		ІКД НАНУ та НКАУ
1.11. Оцінка геометричної та радіометричної точності космічних знімків з КА «Січ-2» за допомогою досліджень на науково-дослідному фотограмметричному полігоні	«Січ-Полігон»		ДНВІЦ «Природа»
2. ПРИКЛАДНЕ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ			
2.1. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Визначення видового складу і стану лісів» (спільно з користувачем)	«Стан лісу»		ЦАКДЗ НАНУ
2.2. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Виявлення лісових та степових пожеж» (спільно з користувачем)	«Ризик»		ЦАКДЗ НАНУ
2.3. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Пошук родовищ нафти та газу» (спільно з користувачем)	«Пошук ВВ»		ЦАКДЗ НАНУ
2.4. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Дистанційний контроль снігового покриву» (спільно з користувачем)	«Сніг»		ЦРЗЗ НАНУ та НКАУ
2.5. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Класифікація підстильної поверхні за покривними елементами ландшафту» (спільно з користувачем)	ПЕЛ		ДП «Дніпрокосмос»
2.6. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Оцінка стану озимих культур» (спільно з користувачем)	«Озимина»		ДП «Дніпрокосмос»
2.7. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Високочастотна атмосферна корекція даних оптичних сенсорів» (спільно з користувачем)	«Атмосферна корекція»		ІКД НАНУ та НКАУ
2.8. Вивчення можливих потреб в інформації з КА «Січ-2» в регіонах України	«ДЗЗ в регіонах»		ДНВІЦ «Природа»
3. НАУКОВО-ОСВІТНІ ЗАХОДИ			
3.1. Аерокосмічна освіта студентської молоді	«Освіта»		НЦАОМУ
3.2. Відпрацювання каналу наддалнього зв'язку з використанням апаратури електронної пошти КА «Січ-2»	«Полюс»		ДП «Дніпрокосмос» НЦАОМУ

Таблиця 2. Основні характеристики космічного апарату «Січ-2»

Характеристика	Очікувані значення
Маса	160 кг
Тип орбіти	сонячно-синхронна
Висота орбіти	668 км
Нахилення орбіти	98.074°
Місцевий час низхідного вузла	10 год 30 хв
Термін активного існування	5 років
Ракета-носій	«Дніпро-1»
НАУКОВА АППАРАТУРА:	
Сканер середнього інфрачервоного діапазону (ССІК)	
Ширина спектрального діапазону	1.51—1.7 мкм
Проекція кроку пікселів в надирі	39.5 м
Кількість пікселів у сканері	1400
Кількість бітів для кодування одного піксела	8
Ширина смуги огляду в надирі	55.5 км
Ширина охоплення	±500 км
Режими зйомки	режим інфрачервоної трасової зйомки
Багатозональний сканувальний пристрій (МСУ)	
Кількість спектральних діапазонів	4
Ширина діапазонів:	
— зелений	0.51—0.59 мкм
— червоний	0.61—0.68 мкм
— близький ІЧ	0.80—0.89 мкм
— панхроматичний, інтегрований у багатозональний сканувальний пристрій	0.51—0.89 мкм
Розрізnenість в надирі (проекція піксела)	7.8 м
Розрізnenість при відхиленні від надиру 35°	13 м
Ширина полоси огляду в надирі	46.6 км
Ширина охоплення	±500 км
Режими зйомки	режим панхроматичної трасової зйомки, режим багатоспектральної трасової зйомки, режим стереоскопічної панхроматичної трасової зйомки в полосі довжиною 140 км
АПАРАТУРА КОРИСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ:	
Підсистема передачі даних	
Частотна смуга для радіолінії «Космос — Земля»	8025—8400 МГц
Тип модуляції	QPSK
Тип кодування	FEC
Ємність запам'ятовувального пристрою	2 Гбайт
Швидкість передачі	32 Мбіт/с
Електронна пошта (інтегрована)	
Частотна смуга радіолінії «Земля — Космос» для абонентського терміналу	144—146 МГц
Частотна смуга радіолінії «Космос — Земля» для абонентського терміналу	435—438 МГц
Частотна смуга радіолінії «Земля — Космос» для вузлової станції	2025—2110 МГц
Частотна смуга радіолінії «Космос — Земля» для вузлової станції	2200—2290 МГц
Потужність бортового передавача	10 Вт
Швидкість передачі повідомлень	9600 біт/с
Об'єм пам'яті	8 Мбайт



Рис. 1. Загальний вигляд супутника «Січ-2»

програм використання даних КА виконано наступні роботи:

- проведено імітаційне моделювання вирішення типових тематичних задач «Науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-1М»;
- актуалізовано завіркові дані на тестових ділянках і полігонах;
- проведено субсинхронні авіаційні зйомки з АКДЗ-30 та наземні полігонні дослідження;
- виконано експериментальні дослідження з використанням океанічної платформи на полігоні Кацивелі;
- визначено актуальні для України задачі супутникового кризового моніторингу повеней, лісових пожеж та екологічного стану Чорного моря; обґрунтовано можливості їхнього вирішення за даними ДЗЗ.
- 3. Виконано «Науково-прикладну програму використання даних КА «Січ-1М» (в частині задач, вирішення яких дозволили функціональні можливості КА) та дослідження з використанням даних зйомок з КА «Метеор-3М».

4. Розроблено та відпрацьовано з використанням даних КА методи вирішення наступних тематичних задач ДЗЗ:

- визначення складу та стану лісів;
- дослідження снігового покриву;
- визначення вологості та вологозапасів ґрунтів.

5. Спільно з одним із провідних підрозділів ESA — Нансенівським центром дистанційного зондування навколошнього середовища (NERSC, Nansen Environmental Remote Sensing Centre, Norway, Bergen) у серпні — вересні 2005 р. проведено космічний експеримент з використанням океанографічної платформи (полігон Кацивелі), автономної буйкової станції та космічної зйомки з КА ENVISAT.

Експеримент проводився з метою відпрацювання організаційних питань при проведенні спільно з ESA оперативних супутниковых спостережень та отримання натурних даних на океанографічній платформі синхронно із зйомками КА ENVISAT для їхнього подальшого аналізу в цілях розвитку алгоритмів оброблення радіолокаційних даних.

Таблиця 3. Рівні оброблення даних ДЗЗ

Етап оброблення	Рівень оброблення	Зміст операцій оброблення
Бортове оброблення	S (супутникove)	Аналого-цифрове перетворення, стиснення, упаковування інформаційних та необхідних службових даних для передавання через радіоканал
Передавання	R (сирі дані)	Реестрування інформації у вигляді, в якому вона приймається наземним інформаційним комплексом
Попереднє оброблення	рівень 0	Розпакування у відповідності до каналів і приладів; формування вихідного космознімка з первинних даних та доповнення його необхідними метаданими
	рівень 1	Здійснення необхідних процедур геометричного та радіометричного коригування і просторового прив'язування за орбітальними даними
Геореференціювання	рівень 2	Перетворення зображення у задану картографічну систему координат з використанням наземних опорних точок
Тематичне оброблення	рівень 3	Оброблення космознімка, змістом якого є отримання значень дешифрувальних ознак або визначення фізичних параметрів об'єктів зондування
	рівень 4	Оброблення космознімка, змістом якого є дешифрування космознімка та складання легенди

6. Виконано роботи щодо розширення міжнародного співробітництва з ДЗЗ:

- забезпеченено участь НКАУ в CEOS;
- забезпеченено участь НКАУ в GEO;
- визначено напрями та етапи розширення міжнародного співробітництва в GMES; розроблено програму «GMES-Україна» та робочі матеріали до семінару ЄК/ЄКА/НКАУ;
- разом з НКАУ та Президією НАНУ розроблено:

 - проект концепції та зміст Державної цільової програми рационального природокористування із застосуванням сучасних космічних та інформаційних технологій дослідження Землі (Національний блок міжнародного проекту «Система систем глобального дослідження Землі — GEOSS»);
 - проект «Моніторинг навколошнього середовища та безпеки» (GEOSS-GMES-Україна);
 - проведено підготовку до співпраці Європейського Союзу і країн Причорноморського регіону в Сьомій рамковій програмі;
 - проведено підготовку до інтеграції Чорноморської системи спостережень в пан-європейську систему оперативного спостереження і прогнозу стану околічних та шельфових морів;
 - розроблено пропозиції щодо спільніх досліджень в напрямку «Перспективи співробітництва Україна-НАТО у сфері космічного моніторингу і захисту довкілля».

ПЕРСПЕКТИВА ПРОДОВЖЕННЯ РОБІТ

Перспектива продовження робіт витікає з:

- необхідності постійного виконання науково-прикладних програм використання даних вітчизняних та закордонних КА для вирішення в інтересах України актуальних тематичних задач

ДЗЗ;

— необхідності створення на основі космічної інформації ДЗЗ комплексу інформаційних технологій та засобів підтримки прийняття рішень рационального використання природних і соціально-економічних ресурсів України з урахуванням техногенного навантаження на природне середовище;

— необхідності постійної співпраці фахівців України з закордонними колегами для виконання міжнародних завіс'язань нашої держави щодо виконання програм GEO та GEOSS і міжнародних проектів, особливо в галузі вивчення та моніторингу трансрегіональних природних і техногенних процесів.

Запуск і експлуатація КА «Січ-2», оснащеного комплексом приладів оптичного діапазону високої просторової розрізненості дозволить створити систему безперервного забезпечення даними ДЗЗ суб'єктів виробничо-господарської, наукової та управлінської діяльності державного, регіонального і місцевого рівнів, зв'язаних із захистом і контролем навколошнього природного середовища, рациональним використанням природних ресурсів, захистом населення від несприятливих змін погодних умов і клімату.

ON THE SCIENTIFIC-APPLIED PROGRAM FOR THE USE OF «SICH-2» SATELLITE DATA

V. I. Lalko, V. S. Oholenko

The general elements and structural features of the developed scientific-applied program for the use of Sich-2 satellite data are considered. The program is a constituent part of the goal-oriented Project «Zonduvannya» for 2003—2007 which was performed by the Scientific Center for Aerospace Research of the Earth (CASRE) within the framework of the State Contract with the National Space Agency of Ukraine.

УДК 528.852.5

С. А. Станкевич, О. В. Шолоник

Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, Киев

Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков

Представлено 25.06.07

Предложено адаптивное многомерное вероятностное преобразование (АМВП) многоспектральных и гиперспектральных цифровых аэрокосмических снимков, реализующее оптимизацию состава спектральных каналов для каждого анализируемого пикселя цифрового изображения. Использование АМВП позволяет более качественно определять эквивалентные функции передачи модуляции многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков, и следовательно, обеспечивать более высокое эквивалентное пространственное разрешение многоспектральной и гиперспектральной аэрокосмической съемки.

Подавляющее большинство современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оснащаются многоспектральными сенсорами на основе многоэлементных дискретных фотоприемников [10]. Широкое применение многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков приводят к настоятельной необходимости разработки автоматизированной технологии количественной оценки их информативности [1]. Очень грубое представление о возможностях системы ДЗЗ дает величина геометрической проекции пикселя цифрового аэрокосмического снимка на поверхность Земли, которую почему-то называют пространственным разрешением. На самом деле пространственное разрешение — это минимальное расстояние между компактными элементами объектов ДЗЗ, еще позволяющее различать их на снимке [2]. Очевидно, что пространственное разрешение зависит не только от величины геометрической проекции пикселя, но и от ряда других факторов, например от радиометрических характеристик объектов и шумов тракта передачи оптического сигнала от объектов к изображению [11].

Проблема количественной оценки пространственного разрешения многоспектральных аэрокосмических снимков усугубляется различиями радиометрических характеристик объектов и шумов в разных спектральных каналах. Например, в некоторых из них объект может вообще не обнаруживаться, то есть пространственное разрешение стремится к бесконечности, а совместное использование не-

скольких спектральных каналов может обеспечить лучшее обнаружение, чем любой из них по отдельности — синергетический эффект многоспектральности [3].

Однако указанные трудности сравнительно легко преодолеваются при исследовании характеристик достижимости конечного результата — выявления объектов по многоспектральным аэрокосмическим снимкам. Однаковость характеристик выявления одних и тех же объектов на разных многоспектральных снимках должна свидетельствовать об одинаковости обеспечиваемого пространственного разрешения — принцип эквивалентности. Поскольку процессы выявления объектов на изображениях принципиально стохастические, то определение эквивалентного пространственного разрешения должно базироваться на статистических моделях [4].

Классическим методом оценки разрешения одномерных изображений, в том числе и дискретных, является пространственно-частотный анализ, основанный на функциях передачи модуляции (ФПМ) звеньев тракта передачи оптического сигнала. Суммарная ФПМ полностью описывает передаточные свойства иконических систем, имеет объективный характер измерения и базируется на хорошо разработанном математическом аппарате. Кроме того, ФПМ используются при синтезе иконических систем.

Функция передачи модуляции определяется как действительный модуль комплексной оптической передаточной функции системы — отношения ком-

плексного пространственно-частотного спектра сигнала на выходе системы к комплексному пространственно-частотному спектру сигнала на ее входе. Физически ФПМ представляет собой коэффициент изменения амплитуды пространственной синусоиды на различных пространственных частотах при передаче ее иконической системой.

Функция передачи модуляции растровой системы ДЗЗ может быть экспериментально определена по цифровому аэрокосмическому снимку этой системы как модуль комплексного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) от дискретной производной нормированной переходной характеристики (пограничной кривой) — изображения на снимке идеального скачка радиометрических характеристик оптического сигнала [5]. Для панхроматического цифрового снимка — это скачок интенсивности, для многоспектрального — скачок интенсивностей всех спектральных каналов. Многомерная пограничная кривая может быть измерена по многоспектральному цифровому аэрокосмическому снимку автоматически — снятием отсчетов цифрового изображения вдоль нормали к разделу однородных полей яркости, соответствующих резкой границе раздела контрастных объектов на снимке [6].

Для выделения значащих границ раздела радиометрических полей на цифровых аэрокосмических снимках используется вероятностное преобразование, вычисляющее для каждого пикселя цифрового изображения вероятность P правильного разделения статистически различающихся радиометрических полей [9]:

$$P(x, \theta) = 1 - \exp[-B(x, \theta)], \quad (1)$$

где x — пространственная координата вдоль выбранного направления θ на снимке, B — статистическое расстояние Бхаттакария между вероятностными распределениями сигналов в радиометрических полях. Вероятностное преобразование легко обобщается для многоспектральных аэрокосмических снимков путем оценивания вероятности по многомерным статистическим распределениям радиометрических характеристик.

Если многоспектральный аэрокосмический снимок имеет всего несколько спектральных каналов, то все они, как правило, являются достаточно информативными и необходимыми при выявлении большинства объектов ДЗЗ. Гиперспектральные же (десятки-сотни спектральных каналов) аэрокосмические снимки для большинства объектов являются информационно-избыточными и имеют единицы (редко — десятки) оптимальных каналов, в которых обеспечивается максимальная вероятность обнаружения объектов, а добавление неинформативных каналов приводит к ее снижению. Информативность комбинации спектральных каналов много-

спектрального аэрокосмического снимка определяется статистическими характеристиками совместного распределения плотностей вероятности разделяемых объектов. Оптимизация состава спектральных каналов — необходимый этап решения тематических задач ДЗЗ с использованием гиперспектральных аэрокосмических снимков [7].

Нахождение оптимальной комбинации спектральных каналов само по себе представляет достаточно простую задачу, однако практическая сложность заключается в том, что оптимальный состав спектральных каналов гиперспектрального аэрокосмического снимка различен для разных пар объектов (фонов). Обычно стараются обеспечить оптимальность состава спектральных каналов по некоторому общему критерию (средняя вероятность, суммарная информативность и т. д.), однако при этом не гарантируется максимум вероятности выявления всех объектов. Вместе с тем, для пары объектов, не граничащих между собой в пределах многоспектрального аэрокосмического снимка, выполнять оптимизацию не требуется. Поэтому, вообще говоря, оптимизация должна быть контекстуально зависимой от состава и взаиморасположения объектовых сегментов сцены ДЗЗ на снимке:

$$\Lambda^*(x, \theta) = \operatorname{argmax}_\Lambda P(x, \theta, \Lambda), \quad (2)$$

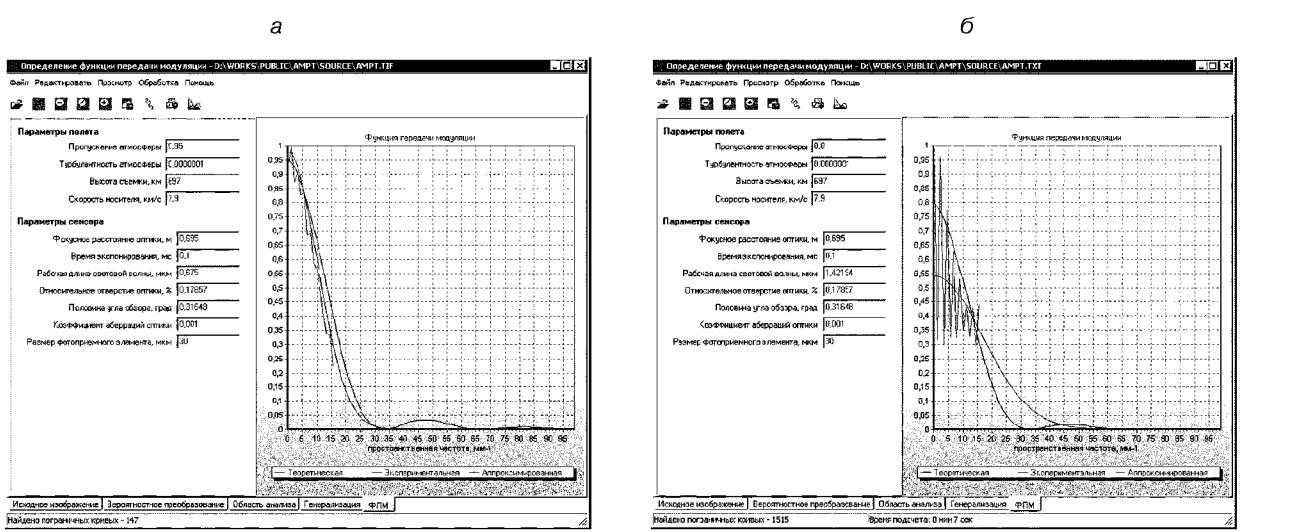
где Λ — логический вектор-селектор спектральных каналов размерности, равной их количеству в исходном многоспектральном изображении [8].

Концепция вероятностного преобразования (1) как раз и заключается в поэлементном анализе многоспектрального аэрокосмического снимка с учетом статистических характеристик некоторой окрестности текущего пикселя. И ничто не мешает выполнять оптимизацию состава спектральных каналов всякий раз при вычислении вероятности правильного разделения радиометрических полей.

Предлагается *адаптивное многомерное вероятностное преобразование* (АМВП) многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков, вычисляющее для каждого элемента цифрового изображения вероятность правильного разделения статистически различающихся радиометрических полей по оптимальной комбинации спектральных каналов (2). Адаптивное многомерное вероятностное преобразование, как и неадаптивное, может быть использовано при нахождении эквивалентных переходных характеристик на многоспектральных цифровых аэрокосмических снимках, однако возможности обнаружения объектов и разделения многомерных радиометрических полей при этом используются наиболее полно. Дальнейшее пространственное дифференцирование и применение ДПФ позволит перейти от эквивалентной вероятностной переходной характеристики к эквивалентной ФПМ много-



Рис. 1. Космический снимок гиперспектрального сенсора Hyperion спутника EO1 (центральная часть Киева, 1 сентября 2002 года)



спектрального цифрового аэрокосмического снимка и таким образом свести проблему определения его эквивалентного пространственного разрешения к классической задаче пространственно-частотного анализа.

Практический пример определения эквивалентной ФПМ гиперспектрального цифрового аэрокосмического снимка центра Киева (рис. 1, сенсор Hyperion спутника EO1, 1 сентября 2002 г.) для среднеоптимальной (рис. 2, *a*) и адаптивно-оптимальных комбинаций (рис. 2, *b*) спектральных каналов показал, что использование АМВП позволяет получить более качественную эквивалентную ФПМ и обеспечить более высокое эквивалентное пространственное разрешение многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков. Улучшение эквивалентного пространственного разрешения для названного снимка составило 15–30 %.

Таким образом, предложенное адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков может быть использовано для повышения качества цифровой обработки и последующей интерпретации материалов многоспектральной аэрокосмической съемки при решении различных тематических задач ДЗЗ.

1. Волошин В. И., Корчинский В. М., Негода А. А. Повышение информативности панхромных цифровых изображений дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 178—181.
2. ДСТУ 4220—2003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003.—18 с.
3. Лялько В. И., Попов М. И., Подорван В. Н., Сахацкий А. И. Методика классификации площадных объектов на многоспектральных космических изображениях на основе последовательного слияния информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. — М.: ИКИ РАН, 2005.—Т. 1.—С. 88—94.

4. Станкевич С. А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 3/4.—С. 81—84.
5. Станкевич С. А. Статичні аспекти визначення функції передавання модуляції аерокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. — Львів: Львівська Політехніка, 2005.—Вип. II.—С. 142—147.
6. Станкевич С. А. Імовірнісно—частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних знімків // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
7. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // Доповіді НАН України.—2006.—№ 10.—С. 136—139.
8. Станкевич С. А. Оптимізація складу спектральних каналів гіперспектральних аэрокосмических изображений при решении тематических задач дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 2.—С. 25—28.
9. Станкевич С. А., Шкляр С. В. Удосконалений алгоритм визначення переходної функції на цифровому аерокосмічному зображені // Ученые записки Таврического национального ун-та им. В. И. Вернадского.—2005.—18 (57), № 2.—С. 97—102.
10. Aspinall R. J., Marcus W. A., Boardman J. W. Considerations in collecting, processing, and analyzing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations // J. Geograph. Syst.—2002.—N 4.—P. 15—29.
11. Nelson T., Wulder M., Niemann K. O. Spatial resolution implications of digitizing aerial photography for environmental applications // Imaging Sci. J.—2002.—49.—P. 223—232.

ADAPTIVE MULTIDIMENSIONAL PROBABILISTIC TRANSFORMATION FOR MULTISPECTRAL DIGITAL AEROSPACE IMAGES

S. A. Stankevich, O. V. Sholonik

Adaptive multidimensional probabilistic transformation (AMPT) for multispectral and hyperspectral digital aerospace images is offered. This transformation realizes realized spectral bands optimal selection for every analyzing pixel of digital image. AMPT allows one to evaluate equivalent modulation transfer functions of multispectral digital aerospace images with higher accuracy and, hence, to provide higher equivalent spatial resolution of multispectral and hyperspectral aerospace imagery.

УДК 528.8.04:(550.361:504.43)

**В. И. Лялько¹, Л. Д. Вульфсон², А. Л. Котляр²,
А. Д. Рябоконенко¹, В. Д. Фрейлихер²**

¹Научный центр аэрокосмических исследований Земли НАН Украины, Киев

²Бар-Иланский университет, Израиль

Подповерхностное зондирование в Р-диапазоне с целью определения влажности почвы в различных ландшафтно-климатических условиях

Представлено 25.06.07

Изложены результаты применения дистанционного подповерхностного зондирования с целью определения влажности в приповерхностных слоях почвы с использованием скаттерометра Р-диапазона. Разработанные модели формирования отраженного сигнала позволили получить зависимости для определения влажности почвы по данным зондирования как для произвольных установившихся вертикальных распределений влажности, так и в процессе их изменения в связи с поливами или осадками.

Оценка объемного влагосодержания W почв является одной из наиболее важных задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Наиболее эффективным методом решения этой задачи является активное зондирование в микроволновом диапазоне (МД) [1].

Настоящая работа посвящена дистанционному определению W в условиях аридного климата на севере пустыни Негев, на фермерских полях до, во время и после орошения, и в гумидных условиях центральной части Украинского Полесья в зоне отчуждения и обязательного отселения ЧАЭС, где значительная часть исследуемой территории скрыта под пологом леса. Исследования выполнялись с помощью скаттерометра Р-диапазона ($\lambda = 0.68$ м) [3] при зондировании в надир, что позволило минимизировать влияние шероховатости поверхности и растительного покрова на обратное рассеяние, а также достаточно просто учесть эти влияния с помощью модели малых возмущений и водного облака соответственно.

Скаттерометр измеряет напряжение $U = KR + U_0$, пропорциональное модулю коэффициента R отражения электрической составляющей сигнала, несущего информацию о величине W поверхностного слоя почвы. Значение K и U_0 , необходимые для вычисления R , определяются по данным внеш-

ней калибровки скаттерометра.

Для решения задачи восстановления влажности поверхностного слоя почвы по данным зондирования необходимо получить зависимости $R = R(W)$, и затем $W = W(R)$.

Значение R для различных типов почвы с плоской поверхностью и произвольным вертикальным распределением W можно определить по формуле [3]

$$\dot{R} = (\dot{Z}_{in}^{(2)} - \dot{Z}_1)/(\dot{Z}_{in}^{(2)} + \dot{Z}_1), \quad (1)$$

где \dot{Z}_1 — импеданс в атмосфере (равен 1); $\dot{Z}_{in}^{(2)}$ — входной импеданс на верхней границе (атмосфера — почва), являющийся функцией вертикального профиля диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}$, который в свою очередь определяется вертикальным профилем $W = W(z)$. Методика расчета $\dot{Z}_{in}^{(2)}$ и $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(W, C, S)$, где C и S — содержания глины и песка в весовых частях, представлена в работе [3].

Согласно формуле (1) для наиболее распространенных случаев неоднородно увлажненной по вертикали почвы, когда значения W и $\dot{\epsilon}$ монотонно возрастают (убывают) от земной поверхности (ЗП) с глубиной. Последнее обуславливает хорошее согласование по волновому сопротивлению и отсутствие значительных отражений от лежащих ниже слоев и явлений интерференции. Отраженный сиг-

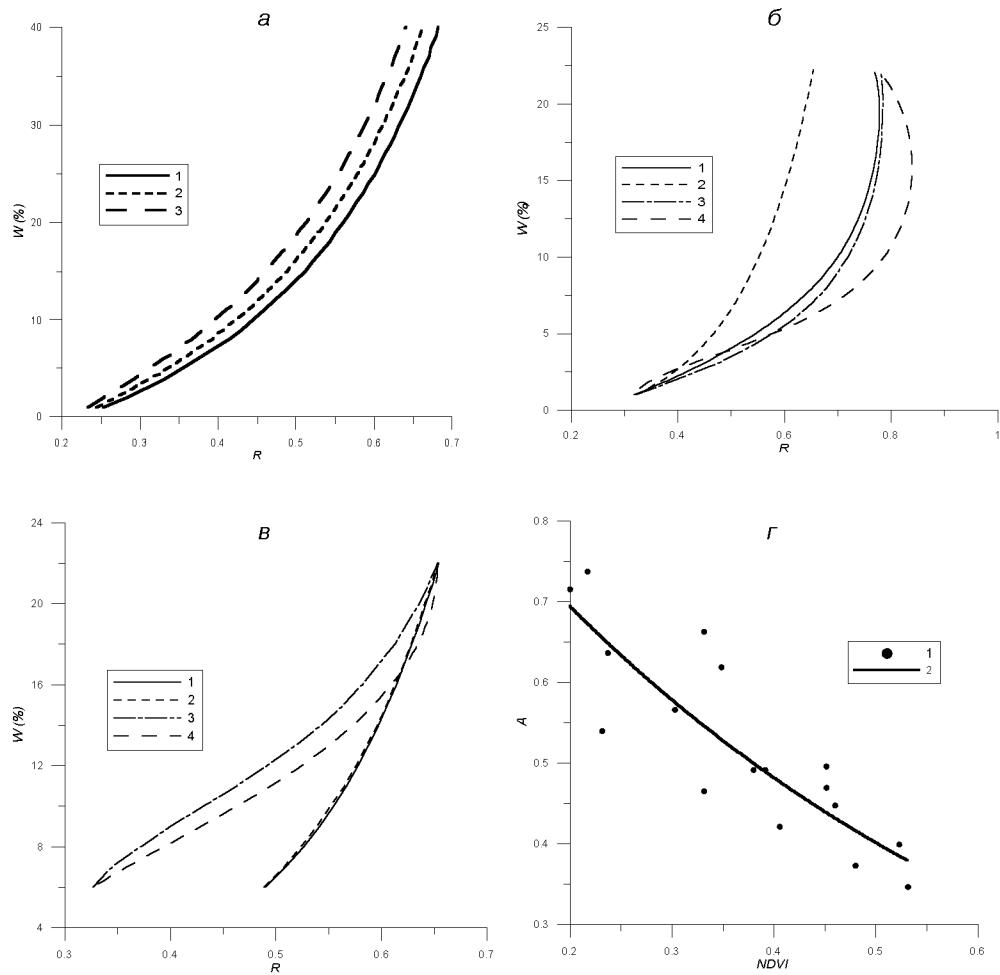


Рис. 1. Зависимость $W = W(R)$: а — для полубесконечного однородного слоя почвы (1 — песчаная почва, 2 — супесчаная, 3 — суглинистая); б — для стадии увлажнения (1 — эксперимент, 2 — модель i, 3 — модель ii, 4 — модель iii); в — для стадии увлажнения (1 — эксперимент, 2 — модель i, 3 — модель ii, 4 — модель iii); г — экспериментальная зависимость $A = A(NDVI)$ для соснового леса (линия — склоняющаяся кривая)

нал формируется в поверхностном слое, толщина которого уменьшается с увеличением W и dW/dz на ЗП и, как правило, находится в пределах 0.1—0.15 м. Значение R для такого неоднородного слоя соответствует значению R для однородного полубесконечного слоя с влажностью, равной средней влажности в указанном интервале. Значение R вычисляется с помощью формулы Френеля [2, 3], которая является частным случаем формулы (1), где $Z_{in}^{(2)} = 120\pi(\dot{e}_2)^{-0.5}$ и $Z_1 = 1$. Зависимости $W = W(R)$, рассчитанные для однородно увлажненной песчаной, супесчаной и суглинистой почв, приведены на рис. 1, а.

Для получения зависимостей $W = W(R)$, которые позволяют определять влажность в поверхностном слое почвы при увлажнении (полив, выпадение

осадков) и высыхании после увлажнения, т. е. при неустановившемся процессе влагопереноса, было рассмотрено три модели. Согласно первой модели (i) при поливе (высыхании) W возрастает (убывает) одновременно в пределах тонкого поверхностного слоя с толщиной H , который подстилается сухим (предельно увлажненным) однородным полубесконечным слоем. Согласно второй модели (ii) фронт увлажнения (высыхания) верхнего тонкого слоя продвигается постепенно от поверхности до дна на глубине H . Для модели (ii) среднее значение влажности в верхнем слое рассчитывается по формуле

$$W = \frac{hW_i + (H - h)W_i}{H}, \quad (2)$$

где для процесса увлажнения $W_i = W_s$ и $W_j = W_r^w$, для процесса высыхания $W_i = W_r^d$ и $W_j = W_s$; h — глубина фронта увлажнения (высыхания), W_s — влажность при полном влагонасыщении, W_r^w — остаточная влажность перед началом увлажнения, W_r^d — остаточная влажность после высыхания. Зависимости $W = W(R)$ для моделей (i) и (ii) рассчитываются с использованием формулы (1), в которой $Z_{in}^{(2)}$ определяется по рекуррентной формуле (5) для $n = 2$ в работе [3]. В третьей модели (iii) предполагается, что значение W в верхнем тонком слое можно распространить на все полупространство. Это позволяет рассчитывать зависимость $W = W(R)$ для рассмотренного выше однородного полубесконечного слоя. Расчетные зависимости для моделей (i), (ii) и (iii) приведены на рис. 1, б и в.

В условиях горизонтальной ЗП при зондировании в надир на длине волн $\lambda = 68$ см учет влияния шероховатости ЗП и растительного покрова (РП) возможен с помощью метода малых возмущений (ММВ) [2] и модели водного облака (МВО) [4]. Далее, учитывая, что основной параметр МВО — содержание воды в растениях (M_v , кг/м²) — является линейной функцией нормализованного цифрового вегетационного индекса (*NDVI*), который, в свою очередь, определяется по данным многозональных космических съемок [5], можем записать:

$$R_e = R \exp[-\alpha(NDVI) + \beta] = R \cdot A, \quad (3)$$

где R_e — коэффициент отражения от шероховатой покрытой растительностью ЗП, α — коэффициент, определяемый видом РП, β — коэффициент, определяемый видом РП и средней квадратичной высотой σ_h шероховатости ЗП, A — функция, учитывающая влияние шероховатости и РП.

Для восстановления влажности почвы W с учетом искажающего влияния шероховатости ЗП и растительности необходимо по значениям R_e , определяемым непосредственно по данным съемки, определить значения R . Для этого выполняется классификация исследуемой территории с целью выделения однородных участков по виду растительного покрова с использованием многозональных космических снимков. Далее для каждого из участков по крайней мере на двух пикетах с различными известными средними значениями $NDVI_{1,2}$, $R_{e1,2}$, $W_{1,2}$, а также S и C , рассчитываются значения $R_{1,2}$ по формуле (1). Затем в предположении, что α и β являются в пределах каждого однородного участка постоянными величинами, находятся их значения с использованием двух уравнений типа (3), записанных для каждого из пикетов. Полученные таким образом значения α и β позволяют в соответствии с (3) восстановить значения $R = R_e/A$, и затем по

одной из зависимостей $W = W(R)$ восстановить W . Пример зависимостей для $A = A(NDVI)$ приведены на рис. 1, г (сосный лес).

Первые серии дистанционных определений W проводились с помощью скаттерометра расположенного на высоте 8 м над поверхностью высыхающей почвы, предварительно увлажненной до полного насыщения. Они сопровождались синхронными наземными определениями объемной влажности почвы в интервалах глубин 0—5, 0—15, 0—30 см, а также значений σ_h [3] с использованием автоматической лазерной установки для измерения параметров шероховатости (BGU GSS 1800). Согласно полученным данным значения σ_h не превышали 0.6 см и практически не влияли на отраженный сигнал [2, 3]. Сравнительный анализ дистанционных и наземных определений влажности (W_r и W_g) в интервалах глубин 0—5 и 0—15 см показал высокие значения коэффициента корреляции ($K = 0.9$) при сравнительно небольших значениях средних квадратичных отклонений ($\sigma \leq 3.3 \%$), что подтвердило эффективность предложенной методики восстановления W . Аналогичные измерения проводились также непосредственно во время полива песчаной почвы до полного насыщения и ее последующего высыхания. При увлажнении наземные определения влажности в слое 0—5 см выполнялись с возрастающим интервалом от 0.5 до 5 мин и при высыхании с интервалом 10 мин. Процессы увлажнения и высыхания сопровождались измерениями значений R скаттерометром. Важно отметить немонотонное изменение сигнала R в течение стадии увлажнения. Значение R возрастало со временем и достигало максимума через 15 мин при $W = 20 \%$, затем уменьшалось, достигая локального минимума через 23 мин при $W = 22.6 \%$, и далее снова увеличивалось. В соответствии с моделями (i) и (ii) этот результат может быть объяснен явлением интерференции сигнала отраженного от ЗП и сигналов многократно отраженных от нижней границы верхнего увлажняемого слоя (5 см), ниже которого влажность почвы остается минимальной в течение 25 мин. Затем граница размыталась, происходило увлажнение лежащих ниже слоев почвы, и явление интерференции прекращалось. Дальнейшее монотонное возрастание R происходило вследствие увеличения W вплоть до перенасыщения. При высыхании величина R монотонно уменьшалась, явление интерференции не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии четко выраженной границы между верхним сухим слоем и более влажными подстилающими слоями. Расчетные зависимости $W = W(R)$ для моделей (i), (ii) и (iii), а также аналогичные экспериментальные зависимости представлены на рис. 1, б и в для стадий увлажнения и высыхания

соответственно. Как следует из рис. 1, б, модель (i) наилучшим образом соответствует результатам эксперимента, что подтверждает правильность гипотезы о формировании верхнего увлажненного слоя в начальной стадии увлажнения почвы. В тоже время в случае высыхания почвы (рис. 1, в) наилучшее совпадение с результатами эксперимента было получено для модели (iii), что свидетельствует о монотонном характере распределения влаги по глубине. Полученные результаты имеют важное методическое значение, поскольку расширяют возможность использования модели (iii) при определении W во время орошения, за исключением короткого начального периода существования верхнего увлажненного слоя, а также в течение всей последующей стадии высыхания. В тоже время исследования показали необходимость использования модели (i) для оценки W в начальный период орошения, что, как следует из рис. 1, б, позволяет избежать завышенных оценок (более чем на 100 %).

Авиационное картирование W на севере пустыни Негев выполнялось с борта самолета «Сесна-174» с высоты 100 м. По данным съемки были построены карты влажности орошаемых сельскохозяйственных полей хозяйства Ашалим. На фоне однородного поля ($W \approx 6\%$) был обнаружен локальный участок $W \approx 34\%$, обусловленный потерями из водонапорной системы.

Картирование влажности в пределах зоны обязательного отселения и западной части Зоны отчуждения ЧАЭС на площади 800 км² выполнялось в период установившейся сухой погоды с борта самолета АН-2 с высоты 150 м. На борту, помимо скаттерометра, была установлена аппаратура гамма-радиометра для картирования экспозиционной дозы гамма-излучения. Поскольку значительная часть исследуемой территории была покрыта лесом, были получены зависимости $A = A(NDVI)$ для определения R и W (рис. 1, г). По результатам дистанционных исследований были построена карта влажности.

В целом представленные результаты дистанцион-

ных исследований существенно расширяют возможности активного зондирования в Р-диапазоне как в условиях аридного климата в пределах орошаемых территорий непосредственно во время поливов, так и в гумидных условиях, где ЗП может быть скрыта под пологом леса. Это является еще одним аргументом, подтверждающим необходимость создания РСА БО Р-диапазона авиационного и космического базирования.

1. Engman E. T. Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture // Remote Sensing of Environment.—1991.—35.—P. 213—226.
2. Jiankang Ji., Henning S., Preben G. «Estimation of soil moisture from the Maestro-1 sar data of Flevoland», Sensors and environmental applications of remote sensing. — Balkema, Rotterdam, 1995.—P. 103—109.
3. Lyalko V. I. et al. Soil Moisture (Water-Content) Assessment by an Airborne Scatterometer: The Chernobyl Disaster Area and the Negev Desert // Remote Sensing Environ, Elsevier Science Inc.—2000.—71.—P. 309—319.
4. Pereira J. M. C., Oliveira T. M., Paul J. C. P. Satellite-based estimation of mediterranean shrubland structural parameters // Adv. remote sensing.—1995.—4, N 3.—P. 14—20.
5. Shutko A. M. Microwave radiometry of water terrain surfaces. — Moscow: Nauka, 1986.—174 p.

SUBSURFACE REMOTE SENSING IN THE P-BAND FOR THE DETERMINATION OF SOIL WATER CONTENT IN DIFFERENT LANDSCAPE AND CLIMATIC CONDITIONS

*V. I. Lyalko, L. D. Wulfson, A. L. Kotlar,
A. D. Ryabokonenko, V. D. Freilicher*

We report the use of the microwave remote sensing as a technique with great potential for the mapping of subsurface soil water content. Remote sensing experiments were conducted in different landscape and climatic conditions of the partially forest-covered Chernobyl nuclear disaster area and the Negev desert. The remote sensor used was a continuous wave frequency modulated P-band scatterometer along with the collection ground trust data such as surface roughness and volumetric soil moisture. The results of the microwave experiments are in good agreement with the developed theoretical models that take into account the effects of the plant cover, surface roughness and interference at the beginning of soil irrigation.

УДК (504.4.062:556.535:528.8.04) [477-25]

О. М. Теременко, А. Г. Мичак,
О. І. Кудряшов, Я. Л. Кудряшова

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України

Використання космічної інформації для вирішення водоохоронних завдань міських територій (на прикладі м. Києва)

Представлено 25.06.07

Запропоновано використання космічної інформації для вирішення водоохоронних завдань міських територій. Приводяться основні водоохоронні задачі. Розглянуті техногенні фактори дії на гідромережу м. Києва. Приведені приклади екологічних досліджень гідромережі з використанням дистанційних методів.

Використання матеріалів багатозональної космічної зйомки є ефективним засобом вирішення гідроекологічних завдань міських територій, основними серед яких є:

— отримання інформації щодо змін гідрографічної мережі, передусім на заплавних територіях, реєстрацію зміни прирусових ландшафтів, розвитку ерозії та абразії, визначення геоекологічного стану прибережних захисних смуг;

— визначення ареалів підтоплення та затоплення на забудованих територіях з метою прогнозу розвитку несприятливих природних та техногенних процесів [1, 2].

Запропоновано концепцію використання космічної інформації для оцінки та моніторингу геоекологічного стану гідромережі, яка пропонується для екологічного моніторингу урбанізованих територій.

При гідроекологічних дослідженнях широке використання мають космічні знімки супутників Landsat, IRS, Terra, Ресурс, Океан О та ін., оснащені мультиспектральною апаратурою типу МСУ, MSS, TM, HRV, ASTER, LISS тощо. Сканери мають до чотирнадцяти каналів від оптичного (0.4—0.75 мкм), інфрачервоного (0.7—14.0 мкм) до теплового діапазону. Роздільна здатність на місцевості коливається у залежності від виду та типу зйомки в широких межах — від 5 до 300 м. Нові апарати Ikonos, Quick Bird дають знімки з просторовою розрізняністю до 60 см.

Об'єктом вивчення в даному випадку є гідромережа м. Києва. Дніпро — домінантний водний

об'єкт цієї мережі. У межах міста ріка приймає невеликі притоки — Либідь, Віту, Сирець, а Нивка впадає вище столиці у праву притоку Дніпра — р. Ірпінь. Сучасна територія міста дренується численними постійними та тимчасовими водотоками, нараховується понад 400 водойм. Найбільші серед них — озера Алмазне, Вириця, Тягле [3].

Гідромережа у межах міської агломерації зазнає постійного та значного впливу антропогенних чинників. Так, до кінця XVIIIст. правий рукав Дніпра, тепер судноплавний, був мілководним, а лівий — Чортний — був глибшим і повноводнішим. Зливалися вони у районі Печерської Лаври, утворюючи заплавний Труханів острів. Після тривалих інженерних робіт (1788—1910 рр.) повноводний Чортний було перекрито, його потік спрямовано до мілководного правого рукава, де зараз судноплавний хід. В подальшому значних змін Дніпро у межах Києва зазнав після створення Київського та Канівського водосховищ. Внаслідок підпору Канівського водосховища відбулося підняття рівня води, зменшилась швидкість потоку, що спричинило затоплення та підтоплення заплавних територій та долин малих рік [4].

Нинішній екологічний стан Дніпра та малих річок і водойм Києва спричинений докорінною зміною поверхні бассейнів і умов формування стоку в результаті ущільнення міської забудови, спорудження шляхів, створення підземної інфраструктури та густої дренажно-водопровідної і каналізаційної мереж. Ландшафтні зміни супроводжувалися перебудовою структури і скороченням гідрографічної

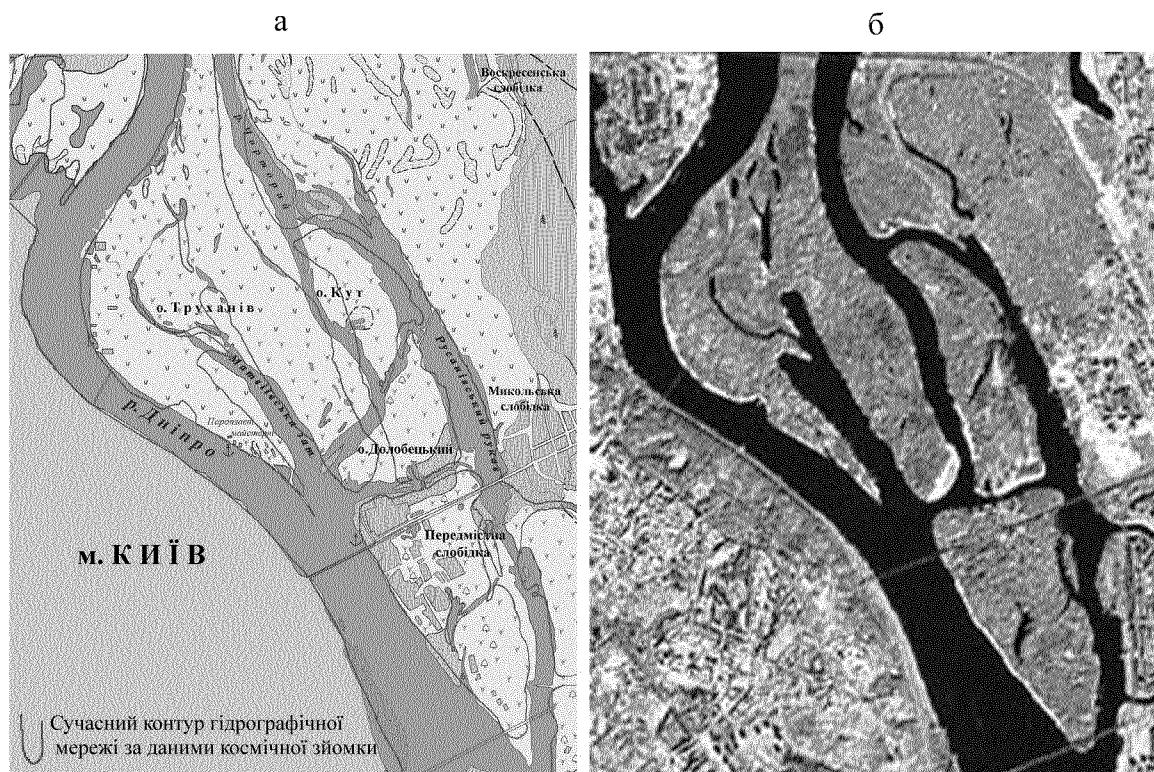


Рис. 1. Визначення змін ландшафтів і контурів островів у русловій зоні Дніпра: а — стан ландшафтів на 1897 р., б — сучасний стан ландшафтів за КЗ Landsat 7ETM+ 2002 р.

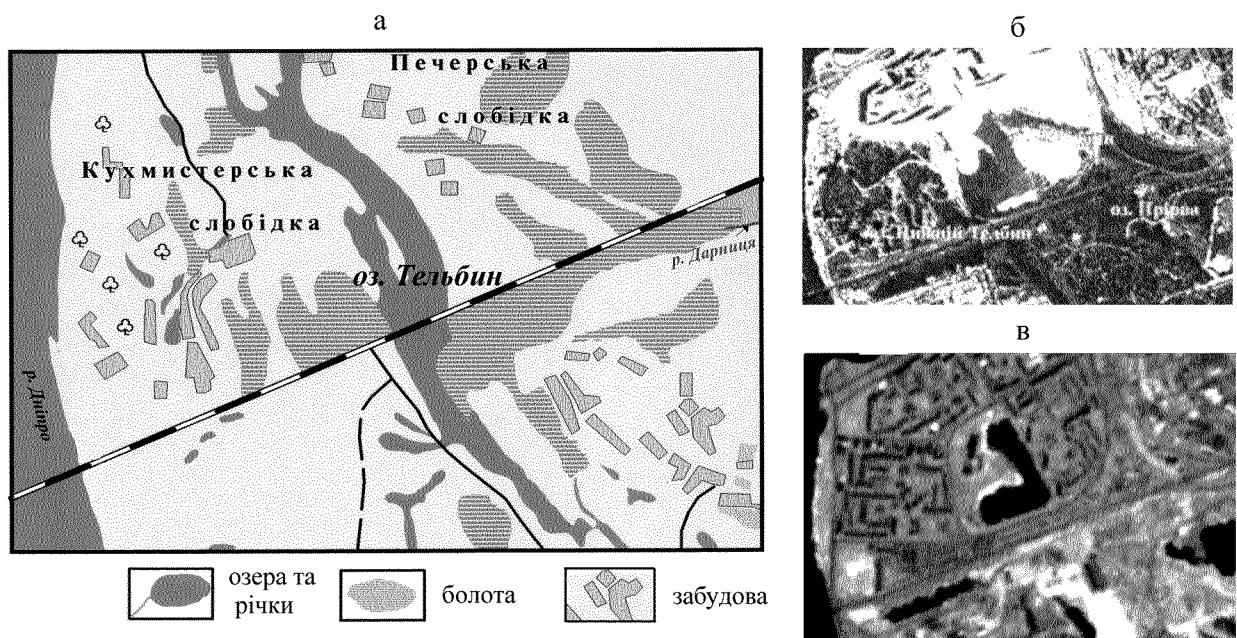


Рис. 2. Визначення змін ландшафтів та гідромережі в заплаві Дніпра (район оз. Тельбин): а — станом на 1897 р. за картографічними даними; б — на 1969 р. за КЗ CORONA; в — на 2003 р. за КЗ Landsat 7ETM+

сітки, порушенням гідралічного зв'язку поверхневих і підземних вод, втратою регуляторної функції заплав водотоків. Якісний стан води в річках та водоймах формується під впливом забруднених стічних вод з забудованої території, які характеризуються високим вмістом завислих часток, нафтопродуктів, важких металів, органічних речовин. Збільшення обсягу та інтенсивності поверхневого стоку, особливо паводкового, призводить до посилення процесів ерозії, змиву ґрунту, який може досягати понад 200 т з 1 км², що в 10–15 разів перевищує такий показник для сільських територій [5].

Виходячи із зазначеного, відсутність необхідних оперативних даних і належного моніторингу гідрографічної мережі та гідроморфних ландшафтів викликає певні труднощі в упорядкуванні цих територій і в оцінці гідроекологічного стану. У вирішенні таких завдань значну допомогу може надати застосування космічних методів ДЗЗ.

Дніпровські острови в межах Києва мають велике рекреаційне значення в системі Київської міської агломерації. Морфометрія островів, ландшафти в цілому зазнали корінних змін внаслідок причин, про які йшлося вище.

На рис. 1 представлена зміна у просторово-часовому вимірі ландшафтів групи дніпровських островів (Труханів, Долобецький, Передмістна Слобідка) за останнє сторіччя. В результаті досліджень та обробки картографічних матеріалів кінця XIX ст. укладено картосхему основних ландшафтів русло-вої частини та заплав Дніпра станом на 1897 р., коли техногенне навантаження на довкілля було відносно незначним. На картосхему винесено сучасний контур гідрографічної мережі за даними космічної зйомки. Виконано синтез КЗ Landsat 7ETM+ з каналів 0.52–0.90 мкм, 0.45–0.52 мкм, 0.76–0.90 мкм з метою дослідження сучасного стану ландшафтів, в першу чергу їхньої гідроморфної складової.

Аналіз космічної інформації свідчить, що морфологічні та морфометричні характеристики берегової лінії найчіткіше відображені на космічних знімках у спектральній зоні 0.7–1.1 мкм. До них належать форма і конфігурація островів, значних акумулятивних форм: мілин, кіс тощо.

В результаті обробки та порівняльного аналізу блоку КЗ починаючи з 1970-х рр. визначені зміни гідроморфних ландшафтів, виконані морфометричні дослідження островів та ареалів відкритих (пляжних) пісків. Порівняння результатів дистанційних вимірювань з традиційними наземними підтвердило високу об'єктивність та оперативність космічної інформації.

Важливого значення надається вивченю змін ландшафтів та гідромережі в заплаві Дніпра. За-

плавні території міста з будівництвом житлових масивів на намивних пісках: Оболонь на правобережжі; Русанівка, Березняки, Троєщина, Осокорки та ін. на лівобережжі, зазнали значного техногенного навантаження. Це привело до корінних змін та порушення природних гідроморфних ландшафтів. Гідроекологічний стан таких ділянок викликає занепокоєння у зв'язку з поширенням загрозливих природно-техногенних процесів підтоплення, затоплення, просідання ґрунтів. В районі житлового масиву Березняки відбувається перебудова ландшафтної системи з природної у природно-техногенну і техногенну внаслідок намиву пісків та інтенсивної забудови (рис. 2).

На заплавних територіях за даними космічних знімків було визначено площи прибережних захисних смуг ряду водойм та типи ландшафтів в їхніх межах. Виконано класифікацію ландшафтів за мультиспектральними КЗ. Для покращення дешифрування ознак космознімків проведено операцію злиття багатозональних та панхроматичних зображень. Усі процедури обробки та дешифрування дистанційних даних проводились на основі програмного продукту ERDAS Imagine [6].

Розглянуті методичні прийоми та результати використання космічної інформації для вирішення геоекологічних завдань на території Києва засвідчили їхню ефективність.

1. Довгий С. О., Лялько В. І., Трофимчук О. М. та ін. Інформація аерокосмічного землемінавства. — Київ: Наук. думка, 2001.—606 с.
2. Екологічний атлас Києва. — Київ: Інтермедіа, 2003.—60 с.
3. Кондратьєв К. Я., Поздняков Д. В. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды // Исслед. Земли из космоса.—1996.—1.—С. 107—121.
4. Паламарчук М. М., Закорчевна Н. Б. Водний фонд Києва // Екологія і ресурси.—2002.—4.—С. 115—126.
5. Теременко О. М., Лялько В. І., Федоровський О. Д., Рябоконенко О. Д. Екологічна інтерпретація космічних зйомок міських агломерацій // Нові методи в аерокосмічному землемінавстві. — Київ: ЦАКДЗ ГН НАН України, 1999.—С. 143—148.
6. Хильчевський В., Курило С. Гідролого-гідрохімічна характеристика малих водотоків території м. Києва // Водне господарство України.—1999.—№ 3-4.

THE USE OF SPACE INFORMATION FOR THE DECISION OF WATER-PROTECTION PROBLEMS OF CITY TERRITORIES

*O. M. Teremenko, A. G. Mychak, O. I. Kudriashov,
Ya. L. Kudriashova*

The use of space information is offered for the decision of water-protection problems of city territories. The basic water-protection problems are listed. Some man-activity factors affecting the hidro-system of Kyiv are considered. Some examples of ecological researches of hidro-system through remote methods are given.

УДК 551.46.08

В. М. Кушнир¹, С. В. Станичный¹, Т. Я. Чурилова²

¹Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь

²Институт биологии южных морей Национальной академии наук Украины

Использование мультиспектральных космических изображений для изучения экологического состояния северо-западной части Черного моря

Представлено 25.06.07

Описується метод і результати визначення індексу кольору $I_t(\lambda_1, \lambda_2)$ для довжини хвиль $\lambda_1 = 469$ нм, $\lambda_2 = 555$ нм за даними вимірювань яскравості випромінювання кольоровим космічним сканером типу MODIS/TERRA. Індекс кольору використано для обчислення просторових розподілів концентрації хлорофілу-а, кольору морської води та її прозорості. Просторова структура і значення концентрації хлорофілу-а за даними дистанційного зондування відповідають результатам синхронних контактних вимірювань у цьому ж районі моря.

Многочисленные спутниковые измерения восходящего излучения цветовыми сканерами SeaWiFS, (1994); MODIS, (1998); MERIS, (1998) и другими дали значительные объемы информации об оптико-биологических параметрах приповерхностных слоев водной среды. Наиболее сложной и изменчивой пространственно-временная структура спутниковых данных оказалась в прибрежных зонах с высоким насыщением промышленными и сельскохозяйственными производствами, в устьях рек с выносом больших объемов минеральной взвеси, биогенных элементов, различных загрязнений. Эти условия характерны для северо-западной части Черного моря, экосистема которого находится в состоянии, близком к критическому. Главная проблема здесь состоит в чрезвычайно большом притоке биогенных элементов и загрязнений при низкой интенсивности вентиляции водной среды. При этих условиях морская экосистема становится нестабильной вследствие загрязнений, эвтрофикации, эрозии берегов, а также других природных и антропогенных воздействий. В связи с этим существует острая проблема регулярного контроля параметров морской среды для адекватной реакции на возможные неблагоприятные последствия. Такой регулярный контроль экологического состояния морской среды в виде пространственно распределенных данных невозможен без применения методов дистанционного зондирования, в частности съемок морской

поверхности цветовыми сканерами. Однако потенциальные возможности таких методов пока широко не используются. Стандартные методы НАСА для обработки оптико-биологических данных Черного моря непригодны, так как в алгоритмах не учитываются региональные особенности черноморских вод.

При дистанционном зондировании морской поверхности к числу наиболее информативных параметров относится индекс цвета, который определяется как комбинация данных оптических каналов с различными длинами волн. Одной из таких комбинаций является отношение нормализованной яркости в двух спектральных участках: $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2) = L_{wn}(\lambda_1)/L_{wn}(\lambda_2)$. При вычислении индекса цвета $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$ происходит компенсация мультипликативных погрешностей измерения и в значительной степени ослабляется влияние таких факторов, как зенитные углы Солнца и бортового спектрофотометра, освещенность морской поверхности, цвет неба. Эти особенности индекса цвета являются принципиальной предпосылкой его использования для изучения экологического состояния морской среды. Величина $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$ связана с такими параметрами, как концентрация кремния и хлорофилла, соленость, цвет воды, глубина видимости стандартного белого диска, показатель ослабления, концентрация взвеси и другими. Соответствующие эм-

тические соотношения получены по результатам судовых измерений в различных районах Мирового океана [1, 3]. С целью изучения возможности использования индекса цвета для экологического контроля в настоящей работе выполнен расчет $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$ для северо-западной части Черного моря на основе данных измерений восходящего излучения морской поверхности цветовыми сканерами MODIS, а также определены основные структурные особенности индекса цвета в этом районе и их связь с концентрацией хлорофилла. Выполнено сопоставление данных дистанционного зондирования и результатов непосредственных (контактных) измерений.

Сигналы бортового спектрофотометра цветового сканера $L_t(\lambda)$, прокалиброванные в энергетических единицах ($\text{Вт} \cdot \text{м}^2 \text{мкм}^{-1} \text{стер}^{-1}$), в значительной степени отличаются от действительных значений яркости восходящего излучения морской поверхности $L_w(\lambda)$ из-за влияния атмосферы.

В наиболее простом виде связь между этими величинами имеет следующий вид:

$$L_t(\lambda) = L_a(\lambda) + L_R(\lambda) + L_w(\lambda)t(\lambda),$$

где $L_a(\lambda)$, $L_R(\lambda)$ — значения яркости, обусловленные аэрозольным и молекулярным (рэлеевским) рассеиванием в атмосфере на длине волны λ ,

$$t(\lambda) = \exp\{-[0.5\tau_R(\lambda) + \tau_{Oz}(\lambda)](\cos\theta_v)^{-1}\}$$

— коэффициент пропускания атмосферы на этой же длине волны. Оптическая толщина $\tau_R(\lambda)$ слоя молекулярного рассеивания слоя равна $\tau_R(\lambda) = 0.0079\lambda^{-4.16}$, (λ , мкм), τ_{Oz} — оптическая толщина озонового слоя, θ_v — зенитный угол бортового спектрофотометра [2].

Атмосферная коррекция данных измерений нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности в настоящей работе основана на определении такой длины волны λ^* в ИК-области спектра, где выполняется условие некоррелированности яркости восходящего излучения $L_w(\lambda)$ и сигнала бортового спектрофотометра $L_t(\lambda^*)$:

$$R[L_w(\lambda) \cdot L_t(\lambda^*)] = 0.$$

Это условие предполагает, что $L_w(\lambda)$ определяется оптической структурой морской поверхности, а $L_t(\lambda^*)$ — исключительно оптическими свойствами атмосферы.

Индекс цвета $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$ вычисляется по соотношению

$$\begin{aligned} I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2) &= \frac{L_w(\lambda_1)q(\lambda_1)}{L_w(\lambda_2)q(\lambda_2)} = \\ &= \frac{L_t(\lambda_1) - L_a(\lambda_1) - L_R(\lambda_1)}{L_t(\lambda_2) - L_a(\lambda_2) - L_R(\lambda_2)} \frac{t(\lambda_2)}{t(\lambda_1)} \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)}, \end{aligned}$$

где

$$\frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)} = \exp\left\{\left[\frac{\tau_R(\lambda_1) - \tau_R(\lambda_2)}{2} + \tau_{Oz}(\lambda_1) - \tau_{Oz}(\lambda_2)\right] \frac{1}{\cos\theta_0}\right\}$$

— поправочный множитель при пересчете яркости восходящего излучения в нормализованную яркость, θ_0 — зенитный угол Солнца [1, 2].

Распределение индекса цвета в северо-западной части Черного моря было вычислено по данным спутниковых измерений 7 октября 2005 г. Основная особенность этого распределения состоит в том, что в прибрежной зоне западной части акватории наблюдаются минимальные значения индекса цвета, что соответствует повышенной мутности водной среды. Эта повышенная мутность обусловлена речным стоком Дуная, Днестра, Днепра и других рек. Их воды характеризуются высокой концентрацией биогенных элементов и загрязнений, которые оказывают влияние на экологические параметры этого района Черного моря. Аналогичные распределения индекса цвета были получены по спутниковым снимкам этого же района, выполненным в мае 2003 г. [1] и, вероятно, относятся к постоянным региональным особенностям района.

Пространственные распределения индекса цвета могут быть использованы для расчета глубины видимости стандартного белого диска $Z_d = 9.876I_{wn}^{0.4325}$, цвета морской воды $CN = 7.8I_{wn}^{-0.4907}$, показателя ослабления $\varepsilon = 0.23 - 0.1511gI_{wn}$ и других оптических параметров приповерхностного слоя моря [3]. Наиболее информативным параметром для оценки экологического состояния морской среды является концентрация хлорофилла-а и его динамика.

С использованием полученных снимков морской поверхности MODIS/TERRA и вычисленных распределений индекса цвета были получены пространственные распределения концентрации хлорофилла-а C_{Chl} для этих дней. Расчет проводился по соотношению [4]

$$C_{Chl} = \exp[1.078 - 2.54 \ln(I(0.469/0.555))].$$

Распределения концентрации хлорофилла-а показаны на рис. 1. Основные особенности этого распределения состоят в увеличении его концентрации вблизи береговой черты, причем наибольшие значения (до $8...10 \text{ мг}/\text{м}^3$) наблюдаются в районах речного стока. В этих же районах концентрация хлорофилла-а характеризуется значительной изменчивостью. В центральной и восточной частях района концентрация хлорофилла-а относительно невелика, и в основном не превышает $1...2 \text{ мг}/\text{м}^3$.

На рис. 2, 3 представлены оптические параметры приповерхностного слоя моря: цвет моря по международной шкале цветности (рис. 2) и показатель ослабления направленного света (рис. 3). В целом

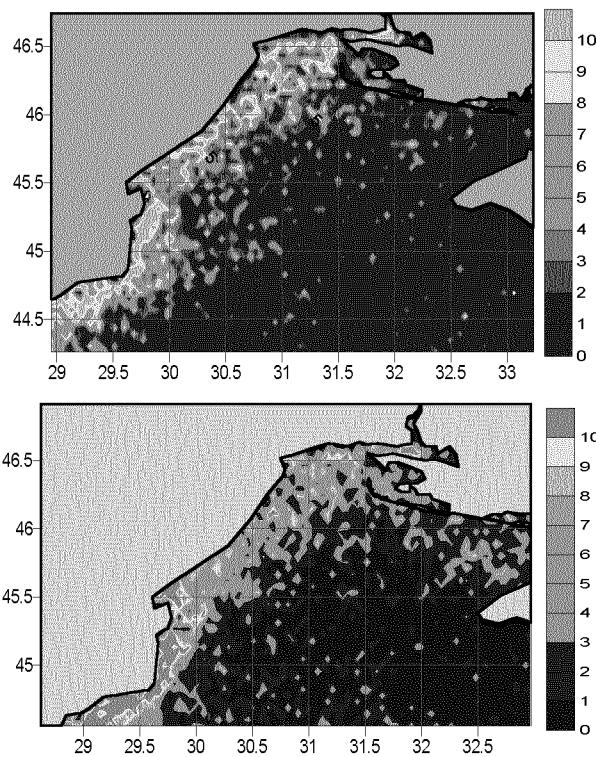


Рис. 1. Пространственные распределения концентрации хлорофилла-а по данным измерений сканером MODIS/TERRA 5 и 7 октября 2005 г.

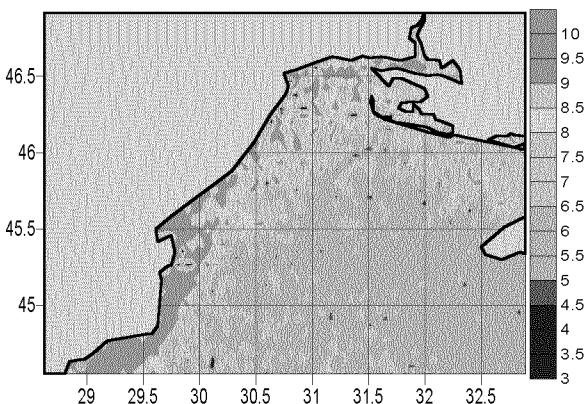


Рис. 2. Цвет моря по международной шкале цветности. В центральной и восточной частях района исследований преобладают голубой и зеленовато-голубой цвет, вблизи берегов — голубовато-зеленый и зеленый цвета

пространственная структура этих параметров соответствует данным прямых измерений в этом районе Черного моря в летний период [1].

Кроме указанных оптико-биологических параметров, состояние экосистемы северо-западного района Черного моря зависит от пространственного

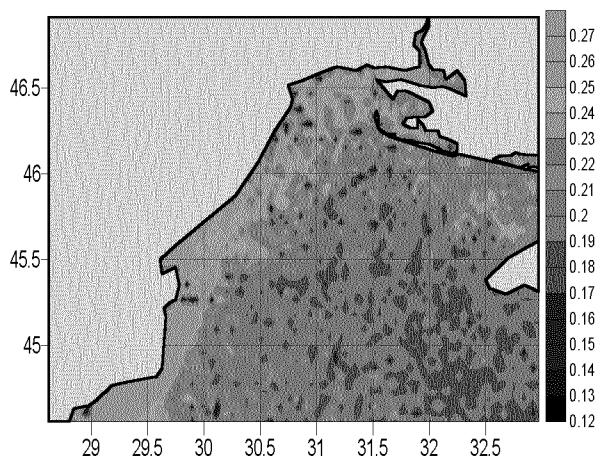


Рис. 3. Показатель ослабления ε , m^{-1}

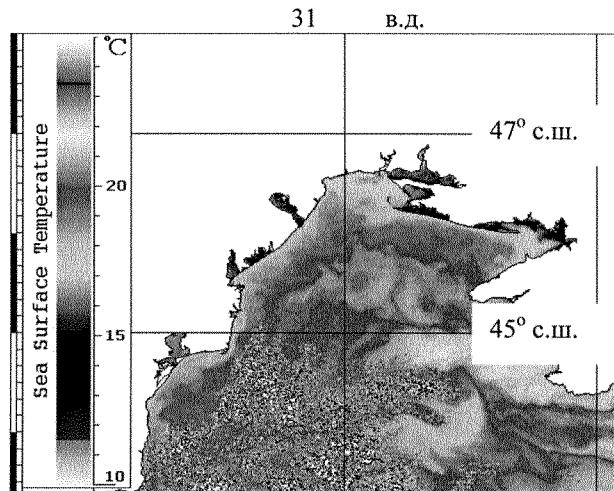


Рис. 4. Температура морской поверхности по данным сканера MODIS/TERRA 7 октября 2005 г.

распределения температуры. На рис. 4 приведено соответствующее распределение, полученное по спутниковым измерениям 7 октября 2005 г. Его основной особенностью является подобие пространственному распределению оптических характеристик: область пониженных температур примерно соответствует области вод пониженной прозрачности вдоль северо-западного берега Черного моря, а область прогретых до 20...22 °C вод соответствует положению зоны вод с высокой прозрачностью. В исследуемом районе в осенний период изменение температура поверхностного слоя связано со стоком более холодных и мутных речных вод. Таким образом, температура является косвенным показа-

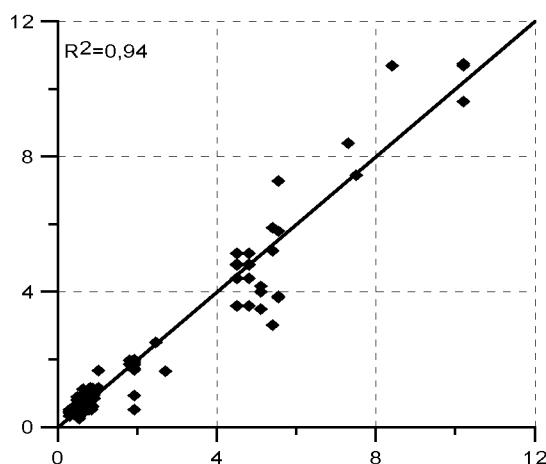


Рис. 5. Сопоставление концентрации хлорофилла-а по данным дистанционного зондирования и непосредственных измерений

телем распространения привносимых со стоком растворенных соединений и взвеси.

Во время спутниковых съемок выполнялись экспедиционные исследования в западной части Черного моря. При этом были выполнены непосредственные измерения концентрации хлорофилла в 35 точках. На рис. 5 представлены результаты сопоставления концентрации хлорофилла-а по данным непосредственных и дистанционных измерений.

Несмотря на существенные отклонения отдельных точек от линии равных значений, общий уровень достоверности высок и составляет 0.94. Это означает возможность использования данных цветовых сканеров и рассмотренного метода обработки данных для оперативных измерений концентрации хлорофилла-а в северо-западной части Черного моря.

Оперативные данные о пространственном распределении оптико-биологических параметров и температуры в северо-западной части Черного моря позволяют объективно определять зоны, где происходят наиболее значительные изменения этих параметров, и следовательно, изменения состояния экосистемы. При высокой температуре морской во-

ды это приводит к интенсификации химических реакций окисления, высоким темпам потребления кислорода и развитию гипоксии.

Таким образом, использование спутниковой информации позволяет проводить оперативный контроль оптико-биологических параметров в северо-западной части Черного моря и их сравнительный анализ на любых временных масштабах. Это дает возможность объективно оценивать пространственно-временную динамику показателей продуктивности, а также выявлять потенциальные зоны риска развития эвтрофикации в экосистеме северо-западной части Черного моря.

1. Кушнир В. М., Станичный С. В. Оптические неоднородности в северо-западной части Черного моря по данным спутниковых измерений цветовым сканером // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005.—Вып. 14.—С. 366—381.
2. Gordon H. R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era // J. Geophys. Res.—1997.—102D, N 14.—P. 17081—17106.
3. Optical remote sensing of the sea and the influence of the atmosphere / Eds V. A. Urdenko, G. Zimmerman. — Berlin: Inst. for Space Research Academy of Sciences of GDR, 1987.—Vol. 2.—197 p.
4. O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchel B. G., et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res.—1998.—103C.—P. 24937—24953.

USE OF MULTISPECTRAL SPACE IMAGES FOR THE STUDY OF THE ECOLOGICAL STATUS OF THE BLACK SEA NORTH-WEST PART

V. M. Kushnir, S. V. Stanichny, T. Ya. Churilova

We consider the method for the determination of the colour index $I_t(\lambda_1, \lambda_2)$ for the wave lengths $\lambda_1 = 469$ nm and $\lambda_2 = 555$ nm from the data of the water leaving radiation obtained with the use of the colour space scanner MODIS/TERRA. The information on the colour index is used to calculate spatial distributions of the chlorophyll-a concentration, sea water colour and its transparency. The spatial structure and values of the chlorophyll-a concentration from the data of remote sensing are in good agreement with the results of synchronous contact measurements in the same area of the sea.

УДК 551.465

Ю. Б. Ратнер, М. В. Иванчик, Т. М. Баянкина,
Е. В. Плотников, А. Л. Холод

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь

Многокомпонентная система диагностики и прогноза динамики Черного моря

Представлено 25.06.07

Представлена разработанная в Морском гидрофизическому институте НАН Украины многокомпонентная наблюдательная система, позволяющая осуществлять непрерывный мониторинг и прогноз гидрофизических полей Черного моря. В результате функционирования системы в квазиоперативном режиме рассчитываются поля температуры, солености, возвышений уровня морской поверхности, скоростей течений, высоты и направления волн.

ВВЕДЕНИЕ

Для контроля состояния и использования ресурсов Черного моря в Морском гидрофизическем институте (МГИ) НАН Украины разработана и успешно функционирует система диагностики и прогноза полей гидрофизических полей, позволяющая выполнять расчеты в квазиоперативном режиме. На первом этапе работ, с середины 1980-х гг. до 1992 г. С. Г. Демышевым и Г. К. Коротаевым была разработана гидродинамическая модель, положенная в основу бассейновой модели циркуляции Черного моря [1]. На втором этапе, с 1992 по 2003 гг. в работах [2, 3, 7] были разработаны алгоритмы асимиляции спутниковых альтиметрических измерений и метеорологической информации, существенно повышенное пространственное разрешение модели и улучшена воспроизводимость климатических особенностей гидрофизических полей и мезомасштабной изменчивости Черного моря. В 2003—2005 гг., сотрудниками МГИ В. Л. Дорофеевым, Г. К. Коротаевым, А. И. Кубряковым и Ю. Б. Ратнером [6, 8, 9] был создан макет системы диагностики и прогноза гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме, прошедший успешное тестирование в ходе пилотного эксперимента ARENA по международной программе ЕС. Это послужило основой для дальнейшего развития работ по созданию системы диагностики и прогноза гидрофизических полей Черного моря.

ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ

Модель циркуляции Черного моря основана на примитивных уравнениях динамики моря [1]. Уравнения модели записаны в декартовой системе координат в форме Громеки — Лемба.

Численная схема модели сохраняет энергию, а в случае баротропных бездивергентных течений — и потенциальную энстрофию. Аккуратная аппроксимация уравнения гидростатики позволяет точно описывать обмен потенциальной и кинетической энергии в пределах каждого бокса с учетом нелинейной зависимости плотности от температуры и солености. Конечно-разностная аппроксимация уравнений по горизонтали выполнена на сетке с шагом 5 км. По вертикали используются 35 неравномерно расположенных горизонтов. Дискретизация во времени осуществляется методом чехарды с периодическим подключением схемы Мацуно. Благодаря такому выбору пространственно-временной схемы дискретизации модель позволяет воспроизводить синоптическую изменчивость Черного моря.

В настоящее время прогноз выполняется в квазиоперативном режиме на сроки до 2.5 сут с задержкой на 12—24 ч, что определяется в основном сроками прогноза атмосферного воздействия по региональным атмосферным моделям.

Высота волн рассчитывается в рамках модели WAM [10], адаптированной сотрудником МГИ

НАН Украины В. В. Фоминым. В ней используются данные прогнозов скорости ветра, получаемые по региональным атмосферным моделям и данные прогноза скорости морских течений в описанной выше модели циркуляции Черного моря.

В результате прогноза рассчитываются поля возышения уровня, температуры, солености, скоростей течений, высот и направлений распространения волн. Они отображаются в виде изображений карт полей (см. сайт <http://dvs.net.ua/mp/>). Примеры карт гидрофизических полей, рассчитанных по модели, показаны на рисунке. Сопоставление результатов расчета с данными контактных измерений дрифтеров и научно-исследовательских судов, свидетельствует об удовлетворительном воспроизведении моделью динамики Черного моря.

В дальнейшем планируется расширить набор моделей, функционирующих в составе системы, за счет подключения экологической модели, модели переноса седиментов и других, а также моделей, позволяющих выполнять прогноз динамики локальных районов морской акватории, с более высоким пространственным разрешением и детальным описанием особенностей динамических процессов.

СПУТНИКОВЫЕ И ОПОРНЫЕ МЕТЕОДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Спутниковые альтиметрические измерения уровня Черного моря. Значения уровня морской поверхности, измеренные спутниками Topex/Poseidon, ERS-2, Jason-1, Envisat и GFO, используются для задания граничных условий и повышения точности расчета физических полей Черного моря. Они поступают из глобального центра обработки альтиметрических измерений — AVISO (Франция) с периодичностью два раза в неделю с задержкой до 3—5 сут. Объемы данных зависят от спутника, с которого они получены, и числа оборотов спутника вокруг Земли, включенных в каждый конкретный файл. После приема данных по сети интернет осуществляется выбор информации по Черному морю, реорганизация формата хранения данных и запись результатов обработки в архив данных альтиметрических измерений уровня Черного моря, являющийся компонентом оперативной базы данных подсистемы диагностики и прогноза.

Опорные метеорологические данные. Метеорологические данные, используемые в моделях, включают: информацию о поле скорости ветра, получаемую по данным реанализа NCEP (США) [5], или по данным диагностики и прогноза на 2.5 сут

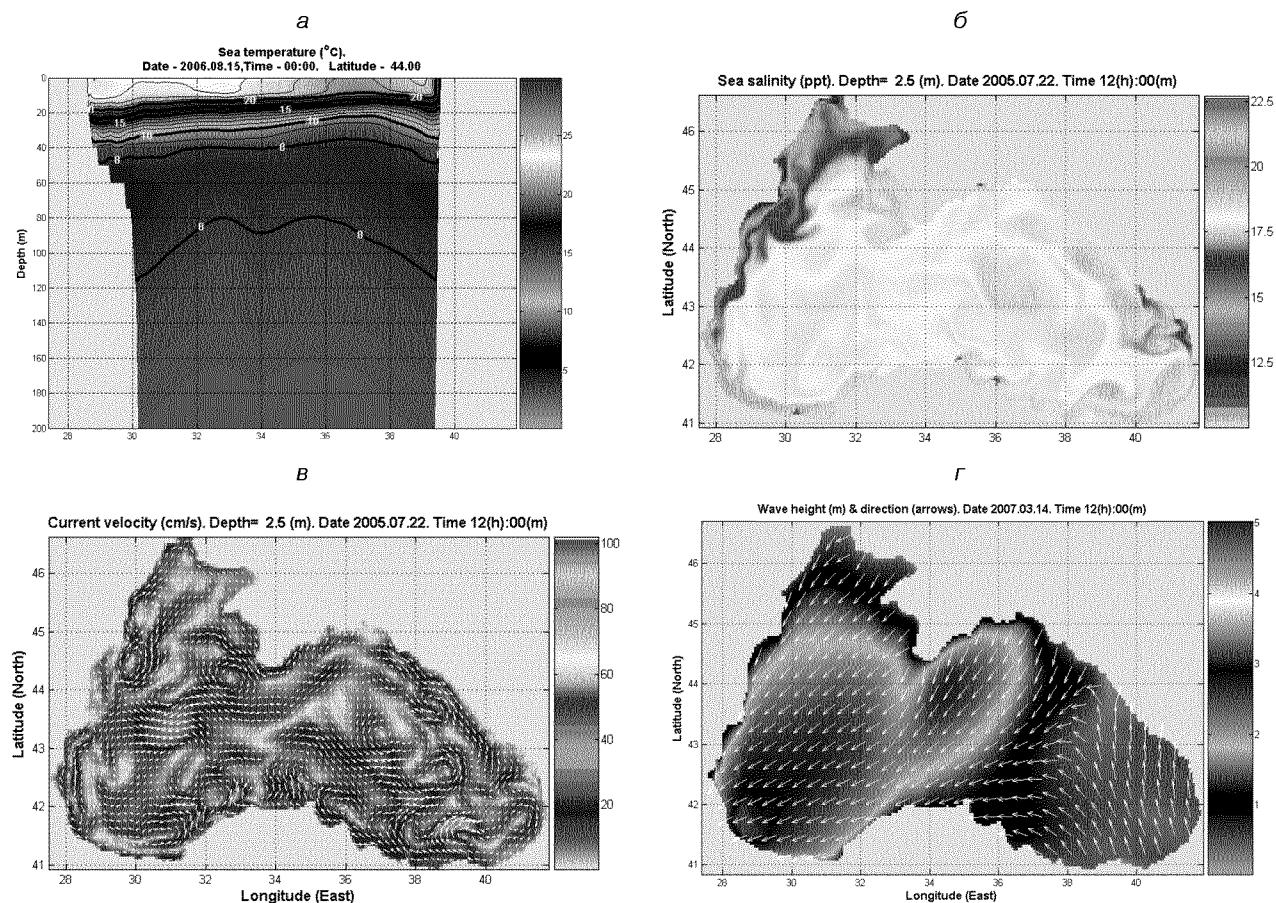
по Европейской атмосферной модели ALADIN (Национальная администрация по атмосфере — NMA, Румыния) [9], или по данным ИСЗ QuikSCAT (США) [4]. Она используется для задания граничных условий на поток импульса из атмосферы в море; информацию о потоках тепла и влаги, получаемую по данным расчетов с использованием атмосферной модели ALADIN из NMA, которая используется для задания граничных значений солености и температуры на поверхности моря [1].

Данные поступают либо на стандартные сроки метеорологических наблюдений (0, 6, 12 и 18 ч UTC — NCEP, NMA), либо между 1—4 и 13—16 ч UTC (QuikSCAT). Данные NCEP следуют с задержкой 1—4 сут, данные NMA и QuikSCAT — 1 сут, NMA — 12—15 ч. Данные реанализа NCEP заданы на сетке $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе, остальные — на сетке $0.25 \times 0.25^\circ$. Сетка, на которой заданы данные QuikSCAT, смещена относительно сетки NMA на $+0.125^\circ$ по широте и долготе. Каждый четвертый узел сетки NMA совпадает с узлом сетки NCEP.

Спутниковые данные о поле температуры поверхности Черного моря. Спутниковые снимки ИК-радиометра AVHRR ИСЗ NOAA принимаются и обрабатываются в приемном центре МГИ НАН Украины для восстановления поля температуры поверхности Черного моря. Эти данные поступают ежедневно с задержкой 3—15 ч. После оперативной обработки принятой информации восстановленные величины температуры поверхности Черного моря записываются в архив в виде электронных карт с пространственным разрешением 1.1 км. Затем поля температуры усредняются по пространственным ячейкам, соответствующим модельной сетке, и за сутки по времени. Эта процедура способствует снижению уровня флюктуационных ошибок спутниковых значений температур и площади морской поверхности, закрытой облачностью. Далее усредненные величины температур вводятся в подсистему диагностики и прогноза физических полей Черного моря, где они используются в соответствии с процедурой ассимиляции [2].

УПРАВЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Структура системы и процедуры обработки информации в ней достаточно сложны. Это требует разработки специальных средств, управляющих выполнением и согласованием различных этапов вычислительного процесса. С этой целью нами были созданы редактор заданий, интерпретатор заданий и утилиты, значительно расширяющие возможности средств разработки и выполнения заданий ОС WINDOWS и LINUX. Они обеспечивают:



Примеры гидрофизических полей, рассчитанных с помощью многокомпонентной системы диагностики и прогноза динамики Черного моря: *a* — разрез поля ТПМ по 44° с.ш.; *б* — поле солености на горизонте 2.5 м; *в* — поле скорости течений на горизонте 2.5 м; *г* — поле высот и направлений волн

- полнофункциональную разработку заданий с их структурированием по назначению;
- более удобное отображение и подробное комментирование текста разрабатываемых заданий;
- отладку заданий;
- возможность выполнения заданий при любом требуемом сочетании автоматического, циклического и интерактивного режимов работы.

Разработанные задания, выполняемые с помощью созданного интерпретатора, представляют собой управляющий комплекс многокомпонентной системы диагностики и прогноза динамики Черного моря.

ВЫВОДЫ

Разработанная система обеспечивает диагноз и прогноз гидрофизических полей в квазиоперативном режиме. Результаты работы системы использова-

лись и используются в ходе выполнения исследовательских и научно-прикладных работ по таким международным проектам как ARENA, ASCABOS, ECOOP, при создании и развитии информационных средств портала отображения данных ДЗЗ в Национальном космическом агентстве Украины. Четырехлетний опыт эксплуатации системы показал ее практическую полезность и возможность создания на ее основе наблюдательной системы для контроля состояния Черного моря.

1. Демышев С. Г., Коротаев Г. К. Численная энергосбалансированная модель бароклинических течений океана с неровным дном на сетке С // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. — М.: ИВМ РАН, 1992.—С. 163—231.
2. Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К. Ассимиляция спутниковых измерений поверхностной температуры Черного моря в модели циркуляции // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2004.—

- Вып. 11.—С. 24—30.
3. Коротаев Г. К., Саенко О. А., Коблинский С. Н. и др. Точность, методология и некоторые результаты асимиляции альбитиметрических данных спутника TOPEX-POSEIDON в модели циркуляции Черного моря // Исслед. Земли из космоса.—1998.—№ 3.—С. 35—51.
 4. Dunbar R. S., et al. QuikSCAT Science Data Product User's Manual. Version 1.0. — Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 2000.—Document D-18053.
 5. Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc.—1996.—77.—P. 437—471.
 6. Korotaev G., Cordoneanu E., Dorofeev V., et al. Near-operational Black Sea nowcasting/forecasting system // European Operational Oceanography: Present and Future. — European Communities, 2006.—P. 605—610.
 7. Korotaev G. K., Demyshev S. G., Knysh V. V. Three-dimensional climate of the Black Sea. Black Sea Ecosystem Processes and Forecasting Operational Database Management System // Report of the Workshop and Project Evaluation Meeting, Istanbul, 15—18 May 2000.
 8. Korotaev G. K., Dorofeev V. L., Ratner U. B. Near-operational system of Black Sea. European Global Ocean Observing System // EUR 21697 Proceedings of the Fourth International Conference. 6—9 June 2005, Brest, France. — P. 64—66.
 9. Stefanescu S., Cordoneanu E., Kubryakov A. Ocean wave and circulation modeling at NIMH Romania // Rom. J. Meteorology.—2004.—6, N 1—2.—P. 75—88.
 10. WAMDIG 1988: The WAM model — A third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanography.—18.—P. 1775—1810.

MULTICOMPONENT SYSTEM FOR BLACK SEA DYNAMIC PROCESSES DIAGNOSES AND PREDICTION

*Yu. B. Ratner, M. V. Ivanchik, T. M. Bayankina,
E. V. Plotnikov, A. L. Holod*

Multicomponent system for Black Sea dynamical processes diagnoses and prognoses, developed in MHI UNAS, is presented. The temperature, salinity, sea level, currents velocities and sea wave's fields can be monitored and predicted by means of this system. The monitoring and prediction results are transmitted via Internet.

УДК 574.472:528.854.4

А. О. Козлова

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України

До оцінювання та картування видового багатства за багатоспектральними даними дистанційного зондування Землі

Представлено 25.06.07

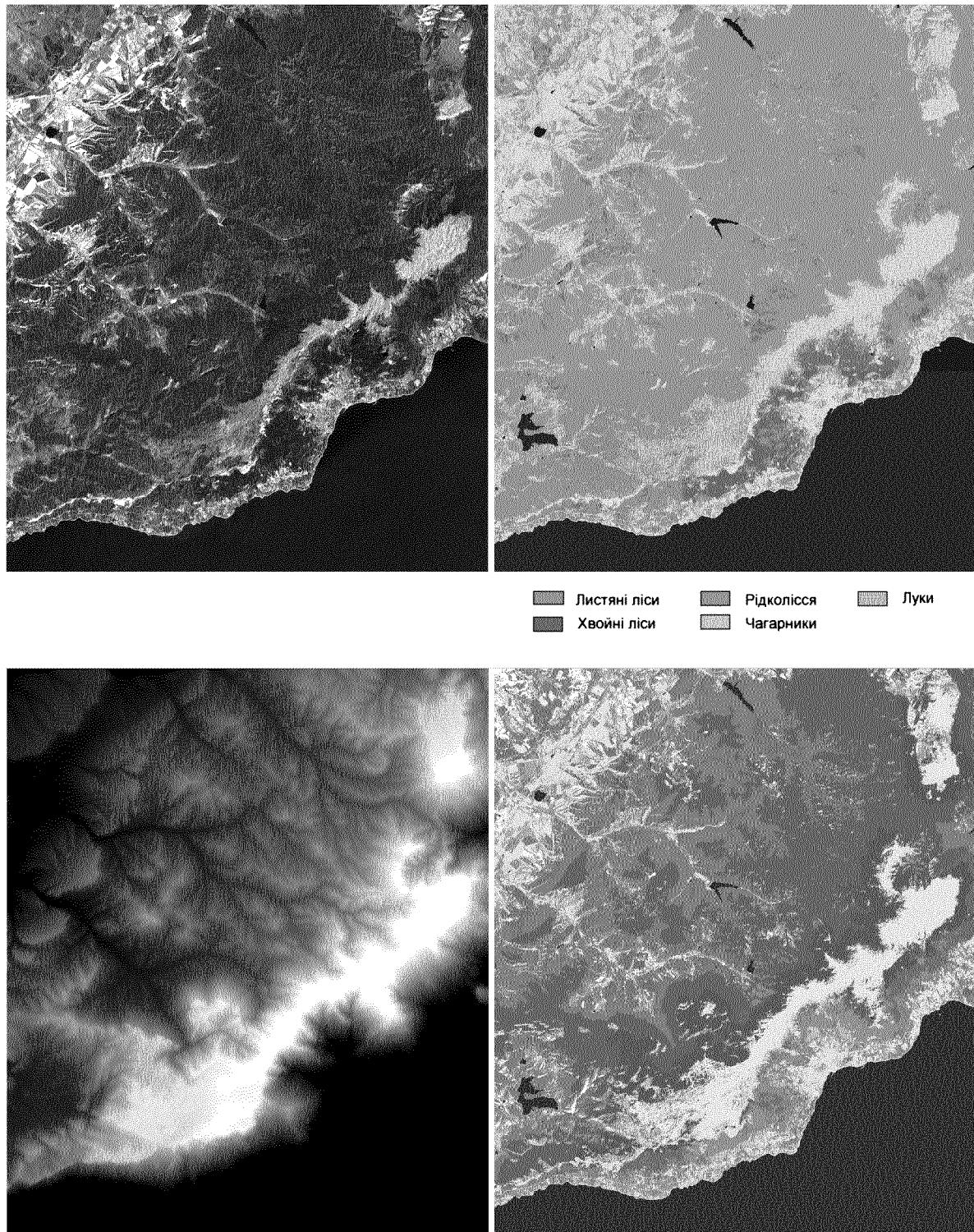
Запропоновано використання стандартних систем класифікації типів земної поверхні для оцінювання та картування видового багатства за багатоспектральними даними дистанційного зондування Землі та наведено умови застосування таких систем при оцінюванні видового багатства гірських та рівнинних територій. Представлено результати демонстраційного оцінювання видового багатства південно-західної частини Кримського півострова за космічним знімком Landsat/ETM+.

Задачі кількісного оцінювання та картування біологічного різноманіття як інтегрального показника стану надорганізмових систем усе частіше вирішуються із застосуванням матеріалів та методів дистанційного зондування Землі. При цьому термін «біорізноманіття» розглядається на рівні організмів і відноситься до видів та їхніх певних характеристик, зокрема розподілу та кількості в межах заданої території.

Один з методів оцінювання біорізноманіття за багатоспектральними космічними зображеннями ґрунтуються на розпізнаванні типів земної поверхні, інакше кажучи біотопів, які можуть бути асоційовані з певним набором характерних видів. Пояснення інформації про відомі вимоги видів до

середовищ існування із встановленими типами створює основу для належного оцінювання видового багатства та потенційного просторового розподілу видів.

Практична реалізація даного підходу передбачає проведення великого обсягу попередніх робіт з обґрунтування та створення відповідної системи класифікації типів земної поверхні, яка б, окрім іншого, забезпечувала можливість інтегрування та порівняння з подібними системами класифікацій для вирішення суміжних задач. Такі роботи потребують чималих ресурсних затрат і застосування широкого кола спеціалістів, що проблематично в рамках малих проектів чи самостійних дослідженнях і приводить до значного зменшення території



Карти території дослідження: а — вихідне багатоспектральне аерокосмічне зображення Landsat/ETM+ (Крим, 10 травня 2000 р., просторова розрізняність 30 м), б — карта біомів за IGBP Land Cover, в — карта висот рельєфу, г — уточнена карта рослинного покриву

Класифікація рослинного покриву території дослідження та її видове багатство

Біом	N	Підклас	Висота над рівнем моря	Загальна кількість видів
Широколистяні ліси	1	Пухнастодубові ліси північного макросхилу	0—450	102
	2	Скельнодубові ліси північного макросхилу (із включеннями грабових і ясеневих лісів)	450—800	107
	3	Букові ліси (включення грабових, ясеневих, кленових лісів)	800—1400	101
	4	Скельнодубові ліси південного макросхилу	500—800	113
	5	Пухнастодубові ліси південного макросхилу	0—500	165
Луки та зернові культури	6	Сільгоспугіддя	0—400	50
	7	Справжні степи	400—600	105
	8	Лучні степи північного макросхилу	600—800	99
	9	Саваноїди	0—450	83
	10	Лучні степи південного макросхилу	450—800	112
	11	Лучні степи, томіляри, луки яйл	800—1545	123
Вузьколистяні ліси	12	Соснові ліси нижнього поясу північного макросхилу	0—400	79
	13	Соснові ліси середнього поясу північного макросхилу	400—1200	103
	14	Ліси з домінуванням сосни Коха	900—1400	104
	15	Соснові ліси середнього поясу південного макросхилу	400—900	144
	16	Соснові ліси нижнього поясу південного макросхилу	0—400	131
Чагарники	17	Шибляковоподібні зарості в комплексі з чагарниковими заростями типу шибляк	0—450	72
	18	Деревно-чагарникові зарості середнього поясу північного макросхилу	450—800	75
	19	Деревно-чагарникові зарості високогір'я	800—1400	88
	20	Шибляк з деревно-чагарниковими заростями	300—800	91
	21	Шибляк з вічнозеленим підліском	0—300	87
	22	Дубові рідколісся в комплексі зі степовою рослинністю	0—400	89
Рідколісся	23	Рідколісся середнього поясу північного макросхилу	400—800	86
	24	Високогірні (кленово-ясеневі) рідколісся	800—1300	90
	25	Дубові рідколісся середнього поясу південного макросхилу	450—800	87
	26	Рідколісся приморського поясу південного макросхилу	0—450	94

Таблицю складено на основі робіт Я. П. Дідуха (1992, 1985, 1988), Ю. Р. Шеляг-Сосонка (1985, 1988), А. І. Дулицького (2001, 1999).

дослідження або погіршення якості проведеної роботи.

В якості основи для оцінювання та картування видового багатства може бути використана карта типів земної поверхні, створена за стандартною системою класифікації. При цьому, залежно від поставлених задач та рівня їхнього вирішення, має залучатися одна з широкоживих, узгоджених між собою систем класифікації типів земної поверхні глобального (IGBP Land Cover, UMD Land Cover, Global Land Cover 2000) або регіонального рівня (CLC 2000, GSE-Land, PELCOME).

Обов'язковою умовою застосування подібних карт є деталізація класів біотопів в контексті характеристик середовища, що визначають загальний

характер розподілу видів рослин і тварин, з подальшим розділенням на підкласи. Уточнення має проводитися за факторами, які не лише обумовлюють диференціацію біоти, а й можуть бути визначені за космічними зображеннями. До таких факторів можна віднести вологість ґрунту, висоту над рівнем моря, експозицію схилів та структуру рослинного покриву.

При дослідженні територій, в межах яких розподіл біоти характеризується висотною поясністю, уточнення стандартних класифікацій здійснюється за висотою над рівнем моря та експозицією схилів — опосередкованими факторами, які є потужними розподільниками інших важливих екологічних факторів: температури, вологості, освітлюваності. На

рівнинних територіях більш доцільним є врахування вологості ґрунту та структури рослинного покриву.

Для кожного класу на основі довідкових даних визначається кількість характерних видів флори і фауни, після чого здійснюється кількісне оцінювання видового багатства для кожного піксела космічного зображення.

Для демонстрації описаного підходу проведено оцінювання видового багатства південно-західної частини Кримського півострову за космічним знімком Landsat/ETM+, одержаним у травні 2000 року (рис. 1, а).

Вибір території дослідження обумовлений високим біологічними багатством даної місцевості, яке є результатом високого різноманіття екологічних умов і широкого діапазону їх прояву (від мінімальних до максимальних значень). На вибір та-кож вплинули гарна вивченість регіону, наявність і доступність детальних описів природних угруповань та їх розподілу під дією зовнішніх факторів.

Для визначення просторового розподілу біомів території дослідження залучалася система класифікації Міжнародного проекту Геосфера-Біосфера (IGBP Land Cover Units), яка також використовується у продуктах MODIS [6] (рис. 1, б).

Урахування рельєфу місцевості проводилося із використанням геореференційованих даних SRTM3v2.0 на територію дослідження (рис. 1, в).

З використанням карти висот, наземних завіркових та допоміжних довідкових даних виконано другий етап класифікування — розділення класів біомів на підкласи.

Як і будь-яка класифікація подібний поділ є суб'єктивним, обумовленим конкретною задачею: необхідністю деталізації виділених територій в контексті градієнтів середовища, що визначають загальний характер розподілу видів рослин і тварин.

Типи рослинних формацій виділялися на основі домінантних видів або форм зростання рослин. Через особливості розташування Кримських гір та кліматичні умови, які внаслідок цього сформувалися, склад і кількість видів рослинних формаций нижніх і середніх поясів значно варіюють залежно від орієнтації макросхилів відносно півдня та півночі. Дана ситуація також знайшла відображення у розробленій системі класифікації. Всього таким чином було виділено 26 типів рослинних формаций — класів і для кожного з них підраховано кількість видів рослин і тварин.

До підрахунку видового багатства вибраної території було включено 343 види вищих судинних рослин, 44 види ссавців і 33 види птахів, середовища існування яких описані в літературі [1—5].

При аналізі флористичного різноманіття виділених класів враховувалися лише типові види з високим ступенем постійності зростання, які утворюють флористичне ядро формації певного типу. При розгляді фауністичного різноманіття робилося уточнення, що розподіл більшості видів тварин значно ширший за виділені рослинні формациї і його межі краще визначаються структурою рослинності, аніж видами рослин. Для кожного класу розраховано загальну кількість видів рослин і тварин. Результат проведеної роботи представлено у таблиці.

Таким чином, карти типів земної поверхні, створені за стандартними класифікаціями і уточнені за матеріалами космічного знімання, є досить зручним та ефективним інструментом оцінювання та картування видового багатства. Одержані результати утворюють основу для подальшого оцінювання біологічного різноманіття.

Спільне використання стандартних інформаційних продуктів ДЗЗ та наземних завіркових даних може стати основою інформаційного сервісу не тільки оцінювання біорізноманіття, а й його моніторингу з періодом спостереження в роки та навіть сезони.

1. Биологическое и ландшафтное разнообразие Крыма: проблемы и перспективы // Вопросы развития Крыма: научно-практический и дискуссионно-аналитический сб. — Симферополь: СОННАТ, 1999.—Вып. 11.—180 с.
2. Дидух Я. П. Растительный покров горного Крыма (структура, динамика, эволюция и охрана). — Киев: Наук. думка, 1992.—253 с.
3. Дидух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Ялтинский горно-лесной государственный заповедник. — Киев, 1980.
4. Дидух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Государственный заповедник «Мыс Мартыян». — Киев, 1985.
5. Дулицкий А. И. Биоразнообразие Крыма. Млекопитающие. История, состояние, охрана, перспективы. — Симферополь: СОННАТ, 2001.—208 с.
6. Strahler A., Townshend J., et al. MODIS Land Cover and Land-Cover Change Principal Investigators /.... http://eospso.gsfc.nasa.gov/ftp_ATBD/REVIEW/MODIS/ATBD-MOD-12/atbd-mod-12.pdf

TO THE ESTIMATION AND MAPPING OF SPECIES RICHNESS FROM MULTISPECTRAL REMOTE SENSING DATA

A. O. Kozlova

Utilization of standard land cover classification systems for species richness estimation and mapping based on multispectral remote sensing data is proposed. The conditions of the use of the systems for highlands and plains are set. We present the results of species richness estimation carried out for the south-west part of Crimean peninsular on the basis of Landsat/ETM+.

UDC 502:330.15

V. Makarenko¹, G. Ruecker², R. Sommer³,
N. Djanibekov³, G. Strunz², O. Kolodyazhnyy¹

¹Space Research Institute (SRI),
National Academy of Science of Ukraine (NASU) — National Space Agency of Ukraine (NSAU), Ukraine

²German Aerospace Centre (DLR), German Remote Sensing Data Center (DFD),
Oberpfaffenhofen, D-82234 Wessling, Germany

³Center for Development Research (ZEF),
University of Bonn, 53113 Bonn, Germany

GIS-based genetic algorithmoptimization tool for supporting land use and land management restructuring

Представлено 25.06.07

For assisting agricultural planners in generating optimized land use and management allocation maps, the “Genetic Algorithms for Land use and Land management OPTimization” (GALLOP) tool was developed. The tool integrates multiobjective genetic algorithms, a geographic information system (GIS) and a database management system within the ArcGIS framework. The tool was applied to a case-study farm in Khorezm, a region in the west part of Uzbekistan. The results show that the combined optimization of multiple objectives is as a win-win strategy that achieved the best compromise between ecological and economic objectives. The GALLOP tool represents an innovative, fast and spatial planning tool for solving complex resource management optimization problems.

1. INTRODUCTION

More and more agro-ecosystems in dry areas have developed towards a critical environmental state. Farmers have received lower yields because practiced land use is not adjusted to ecological site conditions. As a consequence farm profits are often low. Furthermore, focusing on economical or ecological aspects separately may lead to completely different and often non-sustainable farm management policies. In search of viable alternatives, we tackled the questions how selected land-use-system indicators perform if the system is spatially optimized towards ecological, economic or a combination of both objectives. Aiming towards optimizing a set of objectives at the same time, we selected the multiobjective genetic algorithm (MOGA) based on the concepts of Pareto optimality and niche-techniques as analytical part of a spatial decision support tool (Malczewski, 2004). While the numerical optimization models are used in the decision support tool for problem solving, the geo-infor-

mation component is used for spatial analysis and visualization of the spatial problem and solution domain, and both components may be integrated into a user interface to form a spatial decision system for supporting automated land use and land management planning.

The main goal of this paper is to present a spatial planning tool called “Genetic Algorithms for Land use and Land management OPTimization” (GALLOP) that allows one to optimize the spatial land use and land management allocation within a farm landscape based on meeting concurrently, economic and ecological objectives.

The specific research objectives were 1) to develop the system architecture of this tool with optimization routines for several single objectives and combinations of single objectives, 2) to program and design a user-friendly graphical interface that is flexible to read in data from different sources and allows users to select the land uses and land management combinations to be optimized, and 3) to demonstrate

the application of this tool to a case study farm landscape.

2. REVIEW ON SELECTED GENETIC ALGORITHM APPLICATIONS FOR SPATIAL RESOURCE USE OPTIMIZATION

Since the invention of the genetic algorithm (GA) by John Holland (1975) it has been applied to many optimization problems such as in planning of afforestation, urban areas and land use allocation. For example, Ducheyne (2001) worked on the GA in forest management optimization. He proposed to use the GA based on the following statements: (1) GAs can handle conflicting objectives and do not combine multiobjectives prior to the optimization process; (2) GAs allow easy integration between the optimization module and GIS functionality; (3) GAs generate multiple alternatives in a single optimization run due to their population-based approach. In urban planning, Feng and Lin (1999) applied a GA to design several alternative urban plans for the city of Tanhai in Taipei. They concluded that the plans optimized by GA were better than those previously designed by urban planning experts. Moreover, they now had a choice of alternative plans, whereas before only one plan was devised. In land use planning, multiobjective GAs have been used by Matthews (2001). He argued that multiobjective GAs applied to rural land planning have significant potential for assisting land managers in tackling complex resource allocation problems with conflicting and non-commensurable objectives.

3. METHODS

GAs are search methods that are based on natural biological evolution theory. They differ from the conventional optimization techniques as they involve a search from a population of solutions. First, a population of possible solutions is generated. An objective function is evaluated and all solutions in current population are ranked. Next, based on competitive selection strategy, poor solutions are eliminated and the better solutions are selected as parents and recombined with each other to form some new solutions by implementation of genetic operator such as crossover, mutation or inversion. Finally, the new solutions are used to replace the poorer of the original solutions, according to ranking, and the process is repeated, ameliorating the situation from iteration to iteration and approaching the optimal decision.

3.1. Geo-spatial chromosome representation

We used the principle of land-block representation, adopted from Matthews (2001), where each polygon

represents the boundary of the land parcel (field) to which a land use or management type is allocated. The part of the polygon data structure manipulated by the GA can be seen as non-spatial as each polygon is linked to a record in a relational database table with bio-physical and economic conditions on each land parcel. The integer representation is used for this problem. The fixed number of land parcels in a farm structure defines the length of the chromosome.

3.2. Genetic algorithms

The single objective algorithm (SOGA) is based on the classical approach offered by Goldberg (1989). The algorithm was adopted to allow an elitism strategy and used N-point crossover, depending on chromosome length. For bi-objective algorithms, the rank-based fitness assessment approach offered by Fonseca and Fleming (1995) was adopted. This approach was selected because it had a fast performance and was successfully applied in similar tasks, namely in land use (Matthews, 2001) and forest planning (Ducheyne, 2001). Table 1 shows the parameters and corresponding values used in the simulations.

4. RESULTS

4.1. The system architecture of the GALLOP tool

The developed GALLOP tool is based on the following components: spatial optimization routines by genetic algorithms, a geographic information system (GIS), data base management system and graphical user interface within the ESRI ArcGIS 9.2 environment. Visual Basic for Application (VBA) was integrated with ArcObjects development platform for elaborating a user friendly graphical interface and integrating the tool components. The ActiveX Data Objects (ADO) and Open Data Base Connectivity (ODBC) interfaces were used for accessing the MS Access and GIS data bases (Fig. 1).

Table 1. Optimization parameters for developed genetic single- and multiobjective algorithms

Parameters	Value
Selection strategy (optional)	Tournament selection
Probability of mutation	0.01
Probability of crossover	0.80
Elitism	One best chromosome is copied
Stop criteria	Number of iterations, goal function value
Population size	20 – fixed
Number of generation	~3000
Lengh of chromosome	227 – number of fields

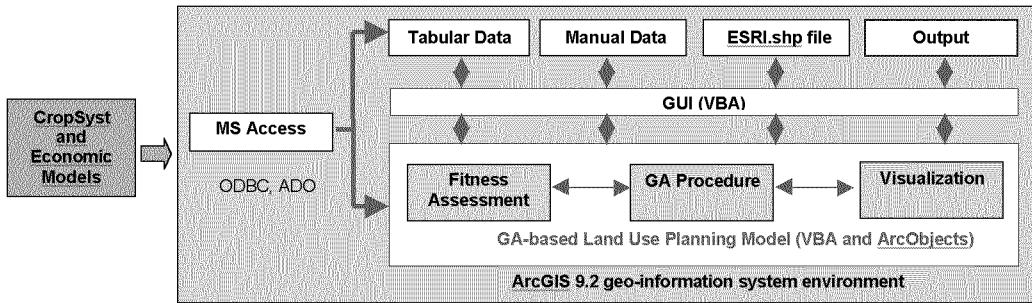


Fig. 1. Integrated component system architecture of GALLOP

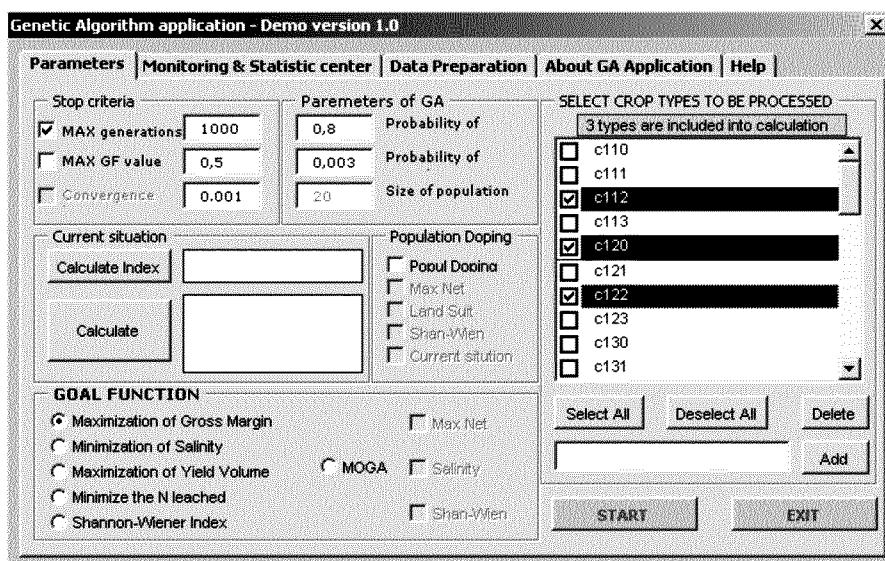


Fig. 2. Main page “Parameters” of the graphical user interface of GALLOP

The geo-information system provides all spatially distributed information to the tool. The specific ecological and economic optimization data used in this study were derived from external crop-soil simulation and non-linear programming models. The user has access to all the functions available in ArcMap for spatial data analyses. The fitness assessment component provides the means of analyzing for the GA module. The visualization procedure serves as decoder from GA-module to the real allocation parcels structure (converting the chromosome) and vice versa. The Genetic Algorithm Module is the core component of an iterative analytical tool. The user specifies a scenario, by choosing the objective functions, defining the management and GA-parameters or by limiting the planning to a subset of the land parcels.

4.2. The GUI of the GALLOP tool

A genetic application toolbar in ArcMap provides access to the specially developed graphical and interactive user forms of the GALLOP tool (Fig. 2).

The graphical user interface includes five pages to manage and monitor the process of optimization. The input parameters (single and multiobjective genetic algorithm parameters, objectives for optimization, etc.) are provided on the main page “Parameters”. The possibility to monitor the optimization process, to track the changes in values of objective functions at each iteration during the whole optimization process, time calculation, changes in the process of algorithm (duplicates of individual, values of Elite individual) is provided on the “Monitoring & Statistical Centre” page. The “Data Preparation” page is used for

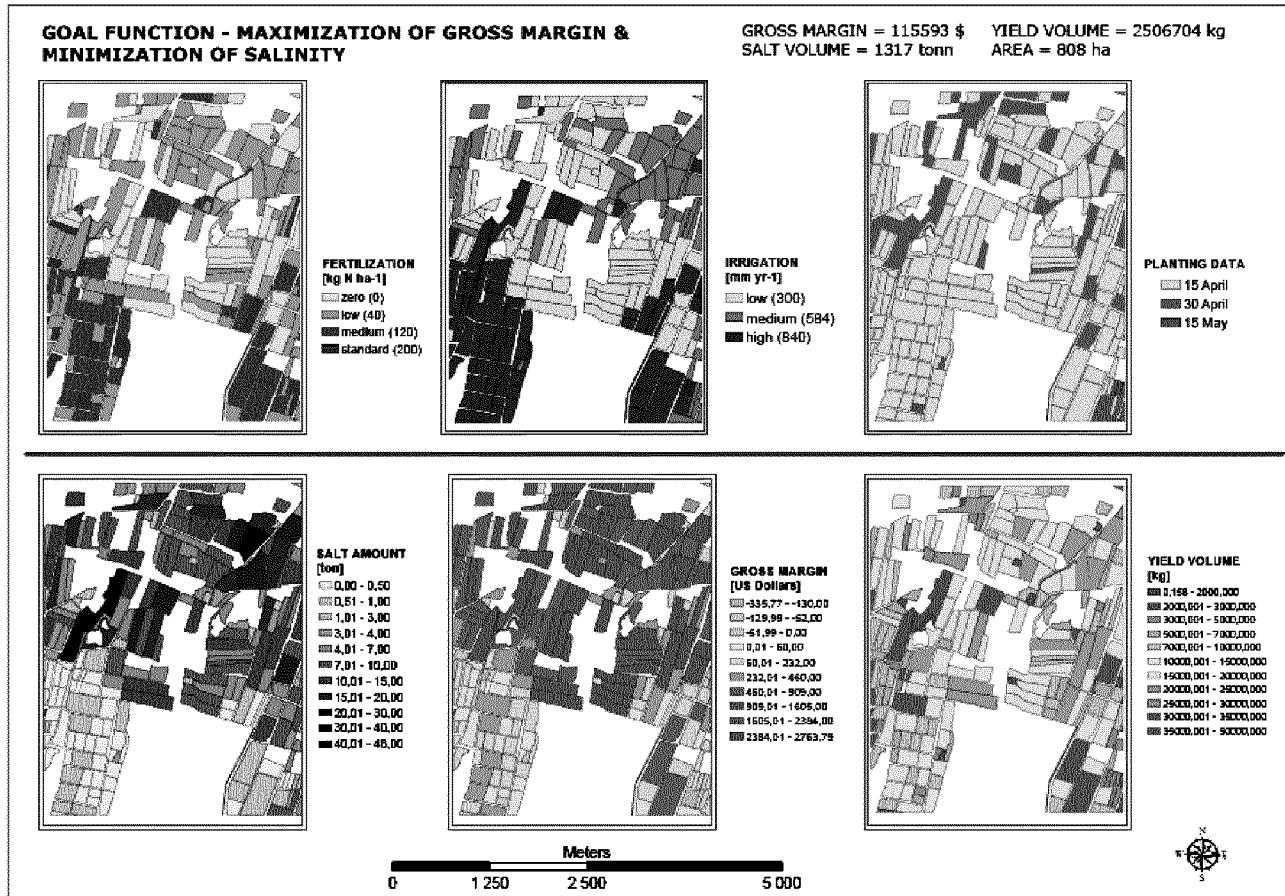


Fig. 3. Result of multiobjective genetic algorithm optimization: maximization of gross margins and minimization of soil salinity are selected as goal functions; white (empty) spots: on-agricultural sites

checking for necessary data for pre- and post-processing calculation of the results.

4.3. Case study: Land use and land management optimization in Uzbekistan

The GALLOP tool was tested in the Khorezm region, Uzbekistan, in the lower reaches of the Amu Darya River. A case-study landscape, the P. Mahmud Shirkat (PM-shirkat; nowadays a privatized farm), representing a typical situation and reflecting all problems of the region, was used as a pilot site for modelling different scenarios for development and reconstruction of the area. In sum, 227 agricultural fields of the PM-shirkat were included, which form the chromosome of corresponding length. Based on land user experts opinion and the current set of regional problems, maximization of the gross margin (GM) was identified as the economic objective. Minimization of soil salinization and Nitrate (N) leached into the groundwater was selected as main

ecological objectives for optimization. Changes of yield volume (in the shown case: raw cotton yields only) were also interesting to us and were calculated in each scenario. The summarized optimization values for each objective are shown in Table 2.

One can see from Table 2 that optimization towards ecological criteria as a single objective (e.g., minimization of soil salinity or N leached) did not really pay off as indicated by gross margin ranging from negative values (for min. soil salinity) to lower values. It was also not profitable if only yields were maximized alone. Alternatively, maximization towards only economic issues (max. gross margins) led to a higher overall soil salinity. If both ecological and economic objectives were optimized (scenarios 5 and 6) a good compromise was achieved. The spatial representation of the best compromise result is shown in Fig. 3.

Compared to the single objective results, this

Table 2. Values of objective functions derived from genetic algorithm tool

Scenario No	Goal function	GM value [US \$]	Soil salinity balance [t]	N leached [t]	Yield [ton]
1	Maximization of GM	158336	3117	64826	2600
2	Minimization of soil salinity	-38666	907	81442	1938
3	Maximization of yield	63636	1786	88745	2978
4	Minimization of N leaching	28343	4319	50733	1789
5	MOGA: combination of 1 and 4	124851	4717	54278	2278
6	MOGA: combination of 1 and 2	115593	1317	70607	2507

optimization really achieves high gross margin and low soil salinity at the same time. In a spatially explicit perspective, this requires higher fertilization and water amount in the marginal areas in the south and less fertilization and low irrigation amount in the more fertile area in the north.

5. CONCLUSIONS

A spatial planning tool called “Genetic Algorithms for Land use and Land management OPTimization” (GALLOP) was developed. The application of the tool to a study site showed that pursuing a single objective of land use restructuring such as maximization of gross margins had a major drawback on the ecology, e.g. by increased soil salinity and nitrogen leached. Similarly, only focusing on land management strategies that achieve high raw-cotton yields did not pay off. The combined optimization of multiobjectives was identified as a win-win strategy that achieved both, high profit and low environmental impact. The spatial explicit optimization reflected the necessary site-specific management for the respective optimized objectives. The GALLOP tool represents an innovative, fast, user friendly and spatially explicit planning tool for solving complex land use and land management optimization problems. Next steps will comprise the inclusion of crop-growth and yield of maize, rice, and wheat, as well as a systematic comparison of the GA performance with classical economic non-linear programming optimization.

REFERENCES

- Ducheyne E. I., Robert R. De Wulf, Bernard de Baets Bi-objective genetic algorithms for forest management: a comparative study.
- Fonseca C. M., Fleming P. J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms I: A unified formulation. — Sheffield, UK, University of Sheffield, January 1995.—Technical Report 564.
- Feng C., Lin J. Using a genetic algorithm to generate alternative sketch maps for urban planning // Computer Environment and Urban Systems.—1999.—23.—P. 91—108.
- Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. — Addison-Wesley, 1989.
- Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. — Ann Arbor: The Univ. of Michigan Press, 1975.
- Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview Progress in Planning 62.—2004.—P. 3—65.
- Matthews K. B. Applying genetic algorithm to multi-objective Land-Use Planning // Phd thesis: The Robert Gordon University, UK, October 2001.
- Stewart T. J., Janssen R., van Herwijnen M. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning // Computer and operations Res.—2004.—31.—P. 2293—2313.

ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ В ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ ПІДТРИМКИ РЕСТРУКТУРИЗАЦІЇ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ

*В. Макаренко, Г. Рюкер, Р. Соммер,
Н. Джанібеков, Г. Штурніц, О. Колодязьний*

Для підтримки прийняття рішень щодо сільськогосподарського менеджменту та розробки оптимальних просторових планів реструктуризації земель було розроблено програмне забезпечення (ПЗ) “Genetic Algorithms for Land use and Land management Optimization” (GALLOP), яке інтегрує адаптований багатоцільовий генетичний алгоритм, гео-інформаційну систему та бази даних в ArcGIS середовищі. В якості тестової території була обрана ферма в Хорезмській області у західній частині Узбекистану. Результати тестування ПЗ показали, що багатоцільова оптимізація є безпрограшною стратегією, яка дозволяє досягти найкращого компромісу між екологічною та економічною складовими. Запропоноване ПЗ GALLOP є іноваційно зручним та швидким засобом вирішення комплексних просторових задач оптимізації та реструктуризації земельного менеджменту.

УДК 528.517

**А. Д. Федоровский, З. В. Козлов,
К. Ю. Суханов, В. Г. Якимчук**

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Комплексное использование космической информации дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений для прогнозной оценки залежей углеводородов

Представлено 25.06.07

Розглядаються методи прогнозування покладів вуглеводнів на основі комплексної оцінки космічної інформації дистанційного зондування Землі і наземних спостережень.

При комплексном использовании космической информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наземных наблюдений для прогнозной оценки наличия залежей углеводородов в качестве источников информативных признаков выступают характеристики геологического строения, параметры геофизических полей и географические особенности территории исследуемого нефтегазоносного региона.

Совокупность признаков, которые уверенно дешифрируются на космических снимках и дополняются данными наземных измерений, позволяет прямо (сигналы от самой залежи, а также от водонефтяного контакта и других ее элементов) или косвенно (сопутствующая нефтегазоносности вторичная минерализация, лито- и гидрохимические аномалии, петрофизические неоднородности и т. п.) создать «портрет» нефтегазоносного участка в виде набора соответствующих информационных признаков. Такой обобщенный «портрет» (образ) при четком понимании природы составляющих его сигналов обладает рядом преимуществ перед традиционным представлением «аномалия типа залежь». В тоже время следует учитывать влияние различных процессов в нефтегазоносных комплексах, приповерхностных отложениях и в современных ландшафтах. Большую роль играют глубина залегания, стратиграфический уровень нефтегазоносности и возраст залежей. При этом близкие по

геологическим условиям нефтегазоносности участки могут быть представлены на поверхности совершенно различными ландшафтами, взаимодействие которых с геофизическими и геохимическими «сигналами» от залежей в зависимости от рельефа, гидрологии, состава почв и характера растительности может носить совершенно различный характер [5]. Все это позволяет рассматривать совокупность нефтегазопоисковых признаков в терминах системного подхода и применять для их обработки при прогнозе углеводородных скоплений методы системного анализа.

Метод многопараметрической оптимизации и нечетких множеств [6] используется, когда на исследуемой территории имеются разбуренные нефтегазоносные месторождения, которые могут быть приняты в качестве эталона. Задача оценки нефтегазоперспективности участка может быть сформулирована следующим образом: насколько по информативным признакам объект распознавания (участок исследуемый территории) сходен с эталоном (участком с промышленно освоенным месторождением).

Принципиальное отличие такого подхода от прямопоисковых методов выделения «аномалий типа залежь» состоит в том, что дискретная оценка принадлежности исследуемого участка к определенному классу заменяется на непрерывную функцию принадлежности. Именно она определяет меру

соответствия исследуемого участка эталонному, т. е. с установленной нефтегазоносностью и соответствующими геологическими и физико-географическими характеристиками.

Для решения таких задач используются алгоритмы, основанные на формировании совокупности дистанционных и наземных информативных признаков, введении функции близости сравниваемых признаков, вычислении их оценок — функций соответствия. Определение степени соответствия исследуемого участка эталону выполняется автоматически путем вычисления функции принадлежности, сформированной на основе функций соответствия.

На космических снимках по спектральным оптическим и пространственным характеристикам изображений растительности и грунтов определяются изменения физиологического состояния растений и структурные признаки (параметры Харалика) элементов ландшафта, находящихся над залежами углеводородов и остальной территории. По наземным измерениям и тематическим картам определяются информативные признаки геологических и геофизических полей для каждого элементарного участка исследуемой территории. На основе полученных комплексных информативных признаков проводится классификация выделенных элементарных участков и оценка их нефтегазоперспективности в соответствии с информативными признаками эталонов.

С помощью изложенного метода в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины выполнялась классификация по нефтегазоперспективности участков фрагмента территории Днепровско-Донецкой впадины [4].

Метод анализа иерархий [7] применяется, когда для определения нефтегазоперспективности участков на исследуемой территории нет промышленно освоенных месторождений, которые могут быть приняты в качестве эталона.

Суть метода заключается в декомпозиции процедуры экспертной оценки нефтегазоносности участков на ряд последовательных оценок, распределенных по иерархическим уровням. В этом случае на каждом уровне проводится экспертная оценка влияния составляющих каждого иерархического уровня на предыдущий уровень и, в конечном счете, на конечный результат. Вычисляются частные и глобальные векторы приоритетов. Для получения указанных векторов строится множество матриц парных сравнений по каждой составляющей иерархического уровня, проводится оценка векторов приоритетов с точки зрения их влияния на предыдущий уровень.

В результате последовательной комплексной обработки полученной информации с учетом весовых коэффициентов, места информативных характеристи-

стик в иерархической системе и значений соответствующих векторов формируется целевая функция — обобщенный критерий. С помощью последнего оценивается степень приоритетности исследуемых участков для их классификации по определению наиболее перспективных из них.

Изложенный метод был использован в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины при оценке нефтегазоперспективности участков шельфа Каспийского моря [2].

Метод системной динамики (адаптивного баланса влияний — ABC) [8] используется, когда на исследуемой территории выделены нефтегазоперспективные участки и требуется их детальная разведка. Метод адаптивного баланса влияний позволяет избежать многоуровневые экспертные оценки с привлечением специалистов высокой квалификации.

В течение многолетней практики дистанционных и геологических исследований установлены определенные причинно-следственные связи между наличием в геологических структурах углеводородных залежей (P) и, например, такими физическими характеристиками земной поверхности, как спектральные оптические (O), температурные (T), радио- (R), геофизические и геологические (G). Наиболее важным для рассмотренного случая является то, что с помощью ABC-метода можно оценить уровень P нефтегазоперспективности на основе известных процессов O, T, R, G . Если на определенных участках территории каждый из процессов P, O, T, R, G может быть выражен линейной комбинацией этих процессов, то формируется динамическая ABC-модель, используемая для моделирования и прогнозной оценки нефтегазоперспективности элементарных площадок внутри участка территории.

Метод был использован в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины при детальной оценки нефтегазоносности выделенного участка шельфа Каспийского моря [1].

Метод количественного структурно-текстурного анализа [10] характеризует геологическое строение региона и позволяет перейти к геологической модели исследуемой территории, используемой для прогнозной оценки нефтегазоперспективности участков исследуемой территории.

При структурно-текстурном анализе применяются следующие преобразования:

- линейные ортогональные преобразования Фурье, Адамара и Хаара, которые в этом случае являются пространственно-частотными спектрами;
- автокорреляционное преобразование, текстурным спектром которого является автокорреляционная функция, а текстурной частотой — двумерный сдвиг;

- преобразование гистограмм, текстурным спектром которого является гистограмма яркости;
- преобразование матриц смежности, текстурным спектром которого является матрица смежности, а в трехмерную частоту входят значения яркости двух сопредельных элементов и угол, задающий направление смежности.

С помощью рассмотренного метода в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины была выполнена обработка изображения космического снимка сенсора ASTER фрагмента территории ОАЭ. В результате была получена диаграмма пространственного распределения ориентации протяженных структур, используемая при классификации исследуемых участков территории по степени нефтегазоперспективности [9].

Мультиспектральный комплексный фитоиндикационный метод прогноза залежей углеводородов [3] применяется с целью оперативной оценки нефтегазоперспективности поисковых площадей, на которых нет разведанных нефтегазоносных участков и отсутствует необходимая информация о геологическом ее строении. Основой методики является комплексная технология дистанционного выделения спектральных характеристик малоинтенсивных оптических аномалий растительного покрова и грунтов над залежами углеводородов и их интерпретация с учетом геохимических информативных характеристик грунтов, полученных в результате наземных наблюдений. В этом случае растительный покров совместно с геохимическими характеристиками грунтов выступают в роли информативных признаков залежей углеводородов.

Гиперспектральный структурно-полевой способ прогнозирования залежей нефти и газа базируется на генетической связи ландшафтов с расположенным под ними залежами углеводородов. Он отличается тем, что с целью повышения уровня достоверности результатов оценки нефтегазоперспективности при сопоставлении контрастов исследуемых участков оптических аномалий на территории нефтегазоносного региона с оптическими признаками участков разбуренных нефтегазоносных месторождений (эталонов) в качестве сравниваемых информативных признаков принята совокупность коэффициентов корреляции между значениями спектральной яркости изображений исследуемых участков, полученных в разных каналах гиперспектрального космического снимка, и представленных как спектральные зависимости от сдвига по длине волн регистрируемого оптического спектра.

Рассмотренные методы прогноза залежей углеводородов на основе системного анализа позволяют выполнить предварительную оценку участков исследуемой территории на нефтегазоперспективность, что дает возможность снизить затраты на последующую геофизическую разведку, оценить перспективность участков на нефть и газ, уточнить внешние границы нефтегазоносной территории.

1. Архіпова Т. О., Товстюк З. М., Козлов З. В. и др. Оцінка нафтогазоперспективності територій з використанням системного підходу та космічної інформації для наступної геофізичної розвідки // ГеоИнформ.—2006.—№ 3.—С. 40—45.
2. Боднар О. М., Козлов З. В., Якимчук В. Г., Федоровський О. Д. Системний підхід до оцінки нафтогазоперспективності територій для наступної геофізичної розвідки // Доповіді Національної академії наук України.—2006.—№ 8.—С. 127—132.
3. Деклараційний патент на винахід UA № 63073A. Мультиспектральний структурно-польовий спосіб прогнозування покладів нафти і газу / Перерва В. М., Тепляков М. О., Архіпов О. І. та ін.—Опубліковано 15.01.2004.
4. Козлов З. В., Лукин А. Е., Федоровский А. Д. Прогноз залежей углеводородов в Днепровско-Донецкой владине на основе комплексной оценки космической информации ДЗЗ и наземных наблюдений // Доповіді Національної академії наук України.—2007.—№ 2.—С. 111—115.
5. Лукин А. Е. Прямые поиски нефти и газа: причины неудач и пути повышения эффективности // Геолог України.—2004.—№ 3.—С. 18—45.
6. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.—328 с.
7. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.—252 с.
8. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофиз, 2000.—225 с.
9. Федоровский А. Д., Архипова Т. А., Козлов З. В., Якимчук В. Г. Оценка нефтегазоперспективности участков морского шельфа // Сборник науч. тр. / НАН Украины. МГИ, ИГН, ОФ, ИнБЮМ. — Севастополь, 2006.—Вып. 14.—С. 314—318.
10. Януш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Недра, 1991.—240 с.

INTEGRATED UTILIZATION OF REMOTE SENSING INFORMATION AND GROUND-BASED OBSERVATIONS TO PREDICTIVE ESTIMATION OF HYDROCARBON ACCUMULATIONS

O. D. Fedorovsky, Z. V. Kozlov, K. Yu. Sukhanov,
V. G. Yakimchuk

Some methods for prediction of hydrocarbon accumulations on the basis of integrated estimation of remote sensing information and ground-based observations are considered.

УДК 5218.8.04

Л. П. Ліщенко

Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі НАН України, Київ

Застосування ландшафтно-системного підходу та аерокосмічної інформації до оцінювання геоекологічного стану гірничопромислових територій

Представлено 25.06.07

Пропонується методика застосування ландшафтно-системного підходу до геоекологічного оцінювання ландшафтних комплексів та дослідження просторово-часової динаміки екологічного стану геологічного середовища гірничопромислових природно-техногенних систем. Ландшафтні комплекси розглядаються як складні системи, що складаються з підсистем — певних типів ландшафтів, з врахуванням їхніх пріоритетів в природно-технічних системах та визначаються в результаті дешифрування матеріалів аерокосмічної зйомки. Запропоновано інтегральний підхід до класифікації ландшафтних комплексів, які відрізняються між собою ступенем антропогенних змін компонентів та спектральними відмінностями на дистанційних матеріалах. В розріблений класифікації виділяються групи природних, модифікованих, антропогенних, техногенних ландшафтів. Для оцінювання геоекологічного стану гірничопромислових природно-техногенних систем створено сім еталонних моделей екологічних станів на основі змін просторової та генетичної структури ландшафтних комплексів.

Системний підхід являється методологічною базою вивчення та оцінювання стану навколошнього середовища, а одним із напрямків реалізації такого підходу є дослідження ландшафтної організації території і геоекологічний аналіз на основі вчення про природно-техногенна системи (ПТС).

Концептуальними підходами до геоекологічного оцінювання в гірничопромислових районах є збереження природного потенціалу геологічного середовища та довкілля в цілому, придатність для подальшого господарчого використання та безпечної проживання людей на даній території.

За критерій оцінювання було прийнято сам ландшафт як територіально організована ділянка, що має повний набір характеристик, які інтегрально передаються на дистанційних матеріалах у вигляді дистанційного образу. Характеризуються ці ділянки з точки зору порушеності (збуреності) природного середовища, тобто аналізуються зміни, які відбулися за час гірничопромислового використання. Вивчається стан ландшафтних комплексів та реконструюється ландшафтна ситуація незмінених, корінних ландшафтів, які існували до антропогенного і техногенного вручання. За часовими інтервалами прослідковуються зміни, які виникли в

результаті діяльності людини та промислового використання території. Найбільш ємним параметром оцінювання ландшафтного комплексу за космічними матеріалами є: зовнішній вигляд ландшафту, інтегральний дистанційний образ, назва, що його описує, та площа, яку він займає. Можливо, цей параметр не дає повної уяви про силу змін і перетвореності ландшафтного комплексу, тому що один і той же зовнішній образ має і приховану внутрішню структуру, яка не проявилась у його фізіономічних характеристиках. Тип функціонального використання також може мати різну інтенсивність впливу, особливо це відноситься до забруднення атмо-, літо- та гідросфер. Але сам спектральний і морфоструктурний образ несе інформацію про ступінь деструкції та змінності ландшафтного комплексу, тобто показує опосередковано, які екологічні стани притаманні тому чи іншому рисунку зображення ландшафтного комплексу. Тобто, шляхом дешифрування космічних знімків давалась інтегральна оцінювання ландшафтного образу з точки зору екологічної безпечності. Для цього по-перше, була обґрутована класифікація ландшафтних комплексів гірничопромислових територій на основі дистанційних матеріалів, яка взята за основу оці-

Таблиця 1. Класифікація ландшафтних комплексів гірничопромислової ПТС

ГЛК	Типи ландшафтних комплексів (ТЛК)	Бал
П-1	1. Степові вододільні	1
	2. Терасові степові і дібровні	1
	3. Сухі лучні (висока заплава)	1
П-2	4. Яружно-балкові ерозійні	2
	5. Схилові ерозійно- та зсувонебезпечні	2
	6. Заплавні, заболочені, острівні	2
	7. Аквальні — руслові, озерні	2
	8. Пасовища, сіножаті	3
	9. Орні (поля)	4
	10. Лісорегулюючі (фруктові сади, лісопосадки, лісополоси)	3
М-1	11. Рекреаційні (садово-паркові, пляжні, санаторно-оздоровчі)	3
	12. Історико-культурні (кладовища, кургани, вали, укріплення, місця стародавніх поселень)	5
	13. Водогосподарчі (меліоровані русла, ставки, греблі, водосховища	5
	14. Меліоровані (канали, зрошенні землі, наливи)	5
	15. Сельбицні (сільські — житлові, садибні і підсобні споруди)	4
	16. Комунікаційні (залізничні колії і споруди, автомагістралі з насипами та укосами, мости, віадуки, трубопроводи, водоводи, лінії електромережі та зв'язку)	5
	17. Белігеративні (військові частини, полігони, укріплення)	6
	18. Тваринницькі (господарчі споруди, скотомогильники, стайбища)	6
	19. Міські ландшафти (капітальна багатоповерхова забудова, транспортна мережа з допоміжною соціально-культурною інфраструктурою, інженерними та промисловими об'єктами)	8
	20. Ландшафти промислових підприємств обслуговуючих галузей (цехи, котельні, склади)	8
	21. Рекультивовані землі (пост кар'єрні)	7
	22. Кар'єрні ландшафти (з порушену літогенною основою від'ємних морфоструктур — кар'єри, ями, шахти, рови)	9
	23. Ландшафти збагачувальних комплексів	9
	24. Відвальні ландшафти (з порушену літогенною основою позитивних морфоструктур відвали порід, терикони, дамби, вали)	9
Т-1	25. Відстійникові ландшафти (гірничопромислових гідроспоруд — відстійники, шламосховища, гідроріввали)	10
	26. Ландшафти гірничо-збагачувальних підприємств — комплекс споруд, відвали, хвостосховища, очисні споруди	10
	27. Ландшафти промислових підприємств важкої індустрії (металургійні, трубопрокатні, машинобудування, коксохімічні, хімічні. Комплекс крупних цехів, будівель, котельень, ТЕЦ)	10
	28. Ландшафти гідротехнічних, енергетичних споруд — градирні, насосні станції, дамби, димові труби, цехи	10

нювання екостану геологічного середовища гірничопромислових територій (табл. 1).

Складність класифікації у тому, що для ПТС важко застосувати традиційні для ландшафтного картографування поняття — місцевість, урочище, фація, тому що вони не притаманні техногенним системам. ПТС є полігеокомпонентна, різногенетична система. Тому для ПТС певних видів техногенного впливу застосовується поняття ландшафтно-функціонального комплексу, а оскільки в нашій класифікації наявні всі типи ландшафтів від первинних природних до техногенних, то ми користуємося узагальненим терміном ландшафтний комплекс (ЛК), котрий можна використовувати для комплексів різного генезису і розмірності (від найдрібніших утворень до найбільших).

За одиницю класифікації приймаємо типи ЛК (ТЛК), які мають подібний ступінь антропогенної трансформації, і об'єднані в групи ЛК (ГЛК), котрі показують однакову величину навантаження на екосистему. При кількісній оцінці необхідно, щоб всі різновідні показники вимірювались в зіставимих одиницях. Тому для характеристики різногенетичних ландшафтних комплексів ми застосовуємо такий показник, як площа, яку вони займають, а точніше, процентне співвідношення всіх ландшафтних комплексів, що складають ПТС. А вже потім умовно оцінюється тиск або вплив, який вони спричиняють на довкілля та яку геоекологічну ситуацію вони створюють.

По-друге, запропоновано еталонні класи геоекологічного стану гірничопромислових ПТС на основі аналізу ландшафтних комплексів, топографічних та тематичних геологічних карт з використанням аерокосмічних матеріалів та наземних спостережень (табл. 1). Природно-техногенна система будь-якої гірничопромислової території надзвичайно неоднорідна за кількістю і складом різногенетичних видозмінених ландшафтних комплексів. З огляду техногенного навантаження вони визначаються різною кількістю та набором промислових переробних підприємств та їхніх відстійників, інших очисних споруд, специфікою транспортної інфраструктури, характером, типом та розмірами селітебної забудови, наявністю відкритих кар'єрів, відвалив або підземних виробок, сховищ, шахт, ставків-накопичувачів, відстійників, тощо. В якості елементів природно-технічної системи, в залежності від задач досліджень, приймаємо її основні компоненти або їхні частини, а також низку інтегральних образів систем, які отримуються за допомогою ДЗЗ.

Під техногенным навантаженням розуміється сила впливу різних видів людської діяльності, що припадає на одиницю площи. У практиці геоекологічних досліджень в залежності від базових наукових, прикладних підходів вивчення техногенного

Таблиця 2. Класи екологічного стану гірничопромислових ПТС

Класи ГП ПТС	Екологічний стан ПТС	Геоекологічні характеристики класу	Характеристики ландшафтних комплексів
I	Еталонний (без антропогенних втручань)	Незмінені геоекологічні умови, природний екологічний фон	Присутні тільки незмінені природні ландшафти
II	Оптимальний	Геоекологічні умови майже не змінені	Переважають не змінені природні ландшафти
III	Нормальний	Сприятливі геоекологічні умови, незначна порушеність літогенної основи	Слабкий антропогенний вплив, переважають група модифікованих ландшафтів
IV	Допустимий	Задовільні геоекологічні умови, відчутні зміни геологічного середовища	Відчутний антропогенний вплив, переважають групи антропогенних та модифікованих ландшафтів
V	Границю допустимий, потенційно небезпечний	Напружені геоекологічні умови, значний вплив на геологічне середовище	Значна швидкість ландшафтних змін, переважають антропогенні ландшафти
VI	Критичний	Несприятливі екологічні умови, значна порушеність літогенної основи	Корінна переробка ландшафтних комплексів, інтенсивна антропогенізація та технізація ландшафтів
VII	Катастрофічний	Незадовільні екологічні умови, сильні порушення геологічного середовища	Переважають техногенні ландшафтні комплекси, сильний вплив на природне середовище

Таблиця 3. Еталони відповідності класів ПТС та груп ландшафтних комплексів

Класи	Групи							
	П-1	П-2	M-1	M-2	A-1	A-2	T-1	T-2
I	60—70	30—40						
II	50—60	20—30—	10—20	5—10				
III	30—40	20—30	20—30	10—20	5—10	0—5		
IV	20—30	20—30	20—30	10—20	10—20	5—10		
V	10—20	10—20	10—20	10—20	30—40	10—20	5—10	5—10
VI	0—5	0—5	10—20	5—10—	5—10	30—40	20—30	10—20—
VII			10—20	0—5	30—40	10—20	40—50	20—30

навантаження існує досить багато методик його обчислення і, відповідно, розроблено ряд оціночних шкал. Все залежить від індивідуальності території, масштабу дослідження тощо. Для гірничодобувного району показником навантаження є площа порушеніх земель, новоутворені форми рельєфу, активізація езогенних процесів та зміни гідрологічного та гідрогеологічного режимів території. Показниками чи індикаторами екологічної ситуації тут можуть бути як окремі компоненти ландшафту (геологічний субстрат, вода, ґрунти, рослинність), екологічний стан яких регулюється гігієнічними аспектами нормування, тобто гранично допустимими концентраціями (ГДК), так і комплексними показниками — продуктивність, видове різноманіття, інтенсивність процесів та інше. Вибір показників для характеристики екологічної ситуації конкретних ландшафтів багато в чому залежить від особливостей і методів отримання інформації.

В теорії систем зв'язки вивчаються з суто функціональної сторони як зміни станів одних елементів під впливом змін станів інших елементів, тобто це

може бути порівняння станів ЛК по різночасових знімках або різних територій по одночасовому. Типи станів ПТС можна визначати по декількох різнопланових критеріях — тривалості існування системи, відповідності природній нормі, забезпеченю соціоекономічної функції, тобто екологічності. З математичної точки зору класифікація станів є послідовним поділом багатовимірного простору станів на його все менші підпорядковані одна одній області. Визначення стану потребує визначення часового масштабу або інтервалу, в якому аналізується стан, та одиниць виміру часу (добові, сезонні, багаторічні або еволюційні зміни системи). Також необхідно визначитись в наборі ознак, якими описується система, тобто які елементи системи зазнають змін. Зміни станів елементів відбуваються в двох виглядах, безперервно та дискретно (стрибкоподібно). Кожне явище можна представити в дискретній формі, якщо місце найбільших змін в просторі (часі) розглядається як різка межа між ділянками незмінених станів.

Можна розрізнати залежні і вимушенні рухи сис-

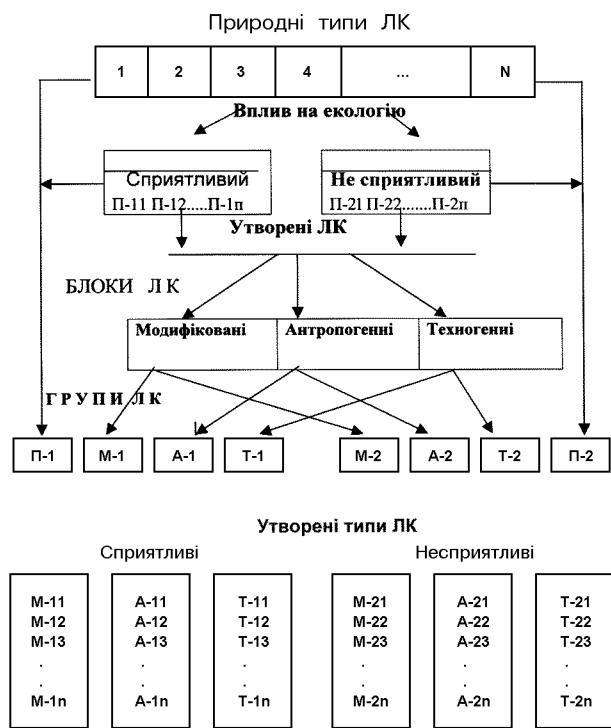


Рис. 1. Систематизація ландшафтних комплексів ПТС для геоекологічного оцінювання

теми та саморозвиток. У першому випадку система наслідує зміни зовнішніх умов (клімат, тектонічні рухи), а в другому зміни відбуваються при незмінному стані середовища і обумовлюються структурою (виникнення водосховища, кар’єра) тобто відбувається одноразова вимушена різка зміна, що супроводжується зміною і перебудовою всієї системи. Щоб досягти стану рівноваги, система проходить певний шлях перебудови і становлення. При цьому змінюється структура ПТС.

Для вивчення зв’язку ландшафт — геологічне середовище — геоекологічний стан, ми використовували матриці, в які пов’язувались характеристики цих явищ для геоекологічної оцінювання. Зв’язки застосовувались для інтерпретації по вектору вплив — зміни — наслідки. Наприклад, видобуток руди — порушеність геологічного середовища, зміна гідрогеологічного режиму — забруднення підземних вод, деструкція ґрунтового покриву, виведення землі з господарського використання. Такі уявні (евристичні) моделі дозволили нам спрогнозувати класи еталонних систем.

Схожість систем проявляється в аналогічному наборі елементів, в схожості структури, стану, поведінки, або деякої комбінації їхніх характеристи-

тик. Впроваджується модель або еталон, тобто система подібна іншій, яка приймається за оригінал. Щоб охарактеризувати геоекологічний стан гірничопромислового району, нам довелося створити декілька моделей ПТС, починаючи з натурального недоторканого антропогенезом ландшафту, який приймається за геоекологічний еталон.

Нормальним станом системи є властивість структури системи не змінювати стан під впливом антропогенних факторів та стихійних природних процесів, тобто область нормальних станів формується та змінюється в умовах відсутності зовнішніх впливів. До області допустимих станів відносяться стани, перебуваючи в яких система здатна виконувати свою функцію (ми оцінюємо безпеку життєдіяльності людини і можливість виконання соціоекономічної функції). До області недопустимих відносяться стани, в яких система виконує функцію неефективно. Границю допустимі стани розділяють області допустимих і недопустимих станів, коли відбувається якісна і кількісна зміна ознак системи, і вона перестає виконувати свої функції.

По мірі впливу техногенних факторів співвідношення ЛК системи змінюються, з’являються нові ЛК, в характеристиці ПТС враховуються переважання певних ЛК, таким чином, створюються моделі еталонних ПТС, які відповідають певним геоекологічним станам гірничопромислових територій. Нами пропонується виділяти сім геоекологічних станів ПТС. Ця кількість, на нашу думку, є найоптимальнішою, крім того, для прийняття рішення згідно з відповідною теорією максимальна кількість параметрів, яку може врахувати людина при виборі рішення, є не більше 6—7.

Порівнюючи площи ЛК, ми не вважаємо, що їхні площи мають лінійну залежність із станом ПТС. Все залежить від певних комбінацій елементів системи, а саме від типів і груп ЛК, з яких вона складається. Для визначення заданої кількості станів (7 класів) були змодельовані всі можливі та ймовірні ситуації, коли природний ландшафт зазнає збурювального впливу антропогенних факторів. Під їхньою дією геоекологічний стан змінюється від оптимальних до критичних і катастрофічних значень (табл. 2) по відношенню до умов існування як системи, так і людини в ній. При цьому елементи системи (наприклад, геологічне середовище як наш об’єкт досліджень або ж самостійна система нижчого рівня — окремий тип ЛК) поступово змінюються під впливом техногенезу шляхом зміни деяких її показників (табл. 3).

На основі експертних оцінок станів гірничопромислових систем запропоновані еталони у вигляді набору різних комбінацій ЛК. Задаються процентні співвідношення площ певних груп ЛК. Моделі представлені у вигляді таблиць еталонів екостанів,

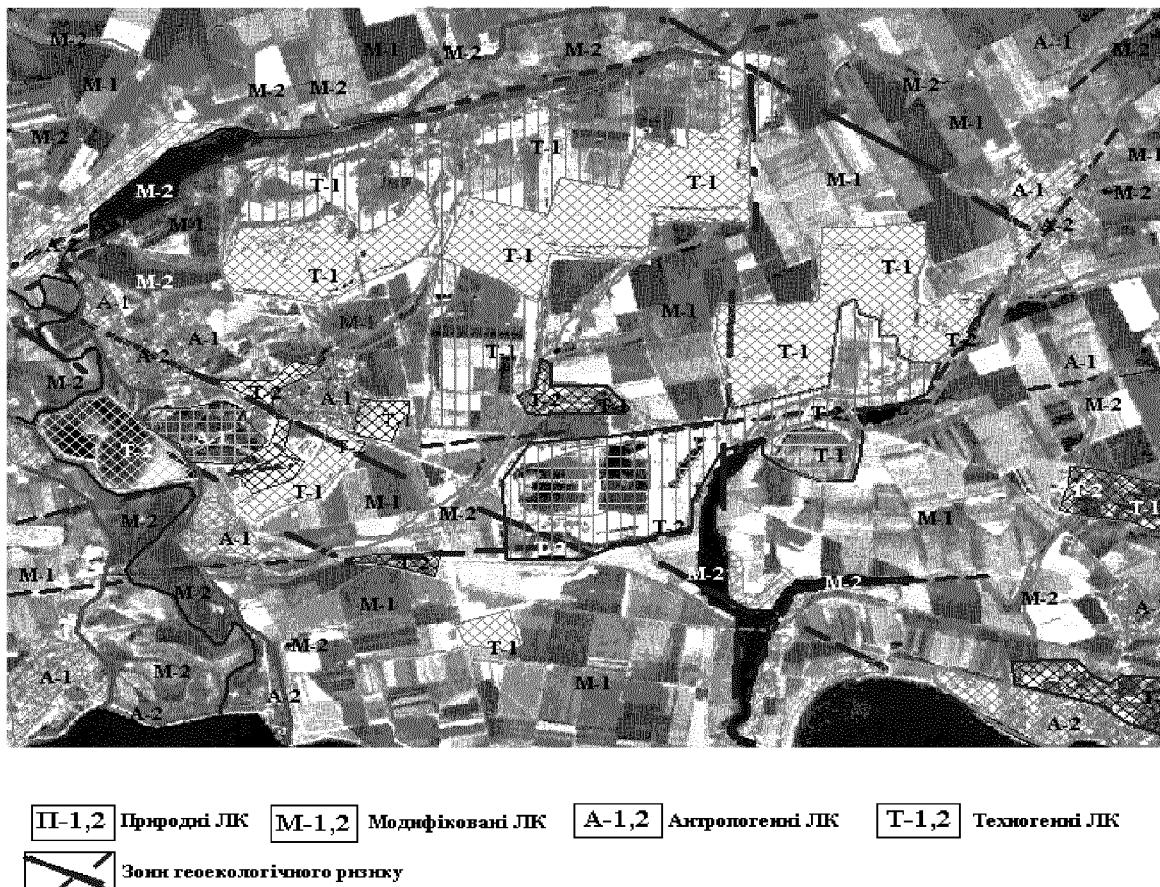


Рис. 2. Результати дешифрування ландшафтних комплексів та класифікації за групами



Рис. 3. Структурна схема класифікації та оцінювання гірничопромислової природно-технічної системи

які можуть розглядатись як інваріанти різних ПТС зі станом від натурального природного до катастрофічного (табл. 3). В залежності від функціональних особливостей всі утворені ТЛК поділяються ще на три розділи: антропогенно модифіковані, антропогенні, техногенні, кожен з яких також включає два підрозділи, тобто кожен із змінених ЛК може формуватись в сприятливих та несприятливих екологічних умовах. До других відносяться ЛК з розвитком екзогенних геологічних процесів, таких як ерозія, карст, зсуви, підтоплення, а також ландшафти, приурочені до лінеаментних зон та вузлів підвищеної тріщинуватості, в яких мають місце зміни геодинамічних напруг та підвищена флюїдопровідність. Зазначені умови впливають на енергомасообмін в ландшафти, підсилюють вплив антропогенних факторів і сприяють створенню небезпечних екоситуацій, таких як підтоплення, забруднення підземних вод, активізація гравітаційних, еrozійних, супозійних процесів, утворюючи тим самим зони екологічного ризику. Ці ділянки і зони виділяються за дистанційними матеріалами за допомогою геоіндикаційного дешифрування. Всього ми отримуємо вісім груп ЛК, які характеризуються як ступенем змінності, так і показником екологічності (рис. 1).

Цей підхід до дослідження гірничопромислових систем допомагає визначити співвідношення проблемних та несприятливих ЛК в системі, їхні негативні наслідки, що мають місце, та визначити напрямок робіт, які потребують невідкладного рішення (оздоровлення навколошнього середовища, науково обґрунтований план організації та подальшого розвитку території).

Дешифрування космічних знімків виконується оператором-дешифрувальником за спектральними яскравостями та просторово-структурними ознаками з використанням комплексного підходу візуально-інструментальних і цифрових методів обробки інформації. На космічних знімках гірничопромислової території, виконаних в оптичних та теплових діапазонах, дешифрується більшість процесів і явищ, які протікають в ПТС. Проводиться: типологічне дешифрування (по типам ЛК), визначення зон геологічних розломів як зон екологічного ризику в гірничопромислових районах, геоекологічне районування або оцінювання геоекологічного стану гірничопромислових ПТС (рис. 2).

Процедура геоекологічної оцінки ПТС у досліджуваному районі являє собою визначення видового складу типів ЛК, об'єднання їх в універсальні групи ЛК, обчислення їхніх відносних площ і

порівняння отриманих в досліджуваному районі характеристик ознак різних класів з параметрами еталонної ПТС (рис. 3).

В дійсності склад елементів і структура ЛК безперервно змінюються під впливом зовнішніх факторів і відбувається повільний перехід ПТС із одного класу в другий. При цьому точний збіг характеристик досліджуваної території з параметрами якогось еталонного класу малоямовірний. Саме тому була застосована методика багатокритеріальної оптимізації і відповідні програми, які дозволили підвищити продуктивність цього процесу і зробити його об'єктивним за рахунок формалізації і автоматизації процедури прийняття рішення.

Апробація методики була проведена при ретроспективній оцінці змін екостану геологічного середовища Нікопольського гірничопромислового району під впливом розробки родовища марганцевих руд промислового навантаження.

Розроблений на основі ландшафтно-системного аналізу і аерокосмічної інформації метод оцінювання геокостану і класифікація гірничопромислових ПТС дає можливість на якісно іншому рівні досліджувати загальні тенденції змін, які відбуваються в геосистемах гірничопромислових територій, і може бути використаний в комплексному геоекологічному моніторингу навколошнього середовища та геоекологічному картографуванні.

SUBSTANTIATION OF ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF MINING TERRITORIES THROUGH LANDSCAPE SYSTEM APPROACH AND REMOTE SENSING DATA

L. P. Lischenko

We propose the technique of environmental assessment based on the landscape system method and remote sensing data. The landscape formations are considered as complex systems consisting of certain landscape types taking into account their priority in the natural-technical systems and determined as the results of remote sensing data interpretation. We use methods of contrast-analogue and indicator interpretation at visual and computer image processing. The integral approach to the landscape classification is suggested; the landscape complexes are recognized by the grade of anthropogenic and technical factors as well as the change ratio of components and their spectral differences in the visible and IR bands. The developed classification takes into consideration the groups of natural, modified, anthropogenic and technical landscapes those are divided also by environmental suitability. To assess the environmental state of mining systems, the seven standard samples of environmental situations were developed. The natural-based and technical systems are considered as an hierachic community of the landscape complexes.

УДК 550.83

Б. С. Бусигін¹, С. Л. Нікулін¹, В. О. Бойко²

¹Національний гірничий університет, Дніпропетровськ

²НВП «Орбіта», Дніпропетровськ

Применение ГИС РАПИД для прогнозирования золоторудной минерализации по материалам космических съемок

Представлено 25.06.07

Розглянуто поточний стан проблеми використання космічних знімків при геологічному вивчені території. Надані основні відомості про спеціалізовану геоінформаційну систему РАПІД та її модуль СЕГМЕНТ, що забезпечує рішення задач обробки, аналізу та інтерпретації матеріалів космічних зйомок. Описано методику прогнозування золотого оруденіння у відкритому гірському районі Узбекистану шляхом лінеаментного аналізу космічних знімків, зроблених зі супутника SPOT-4. Наведено порівняння результатів прогнозування, що отримані з використанням супутникової інформації, та результатів інтерпретації геолого-геофізичних даних.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие космических технологий и математических методов обработки пространственно-привязанных данных полностью изменило характер производственных и исследовательских процессов в геологии, недропользовании, экологии. В настоящее время они базируются на повсеместном использовании компьютерных технологий на базе геоинформационных систем (ГИС-технологий). При этом анализ космических снимков (КС) стал одним из основных подходов к геологическому и геоэкологическому изучению территорий. Это связано с постоянным снижением стоимости КС при возрастающей детальности и оперативностью их получения.

На кафедре геоинформационных систем Национального горного университета уже более 20 лет разрабатывается и совершенствуется специализированная ГИС РАПИД (распознавание, автоматизированное прогнозирование, интерпретация данных). Изначально система предназначалась для обработки и комплексного анализа наземных картографических и цифровых геолого-геофизических данных (геофизические поля, результаты геохимических съемок, геологические факты) с целью поиска и прогноза месторождений полезных ископаемых и решения геоэкологических задач. ГИС РАПИД, в частности, включает подсистемы ввода и фильтрации данных, расчета разнообразных трансформаций исходных данных и оценки их информативности, кластеризации, распознавания и ранжирования (рис. 1). Технология работы, реализуемая

ГИС РАПИД, базируется на методах распознавания образов, обработки изображений, геостатистики, пространственного анализа и использует принцип многовариантного решения задач посредством имитационного моделирования и проведения вычислительных экспериментов [1]. В целом ГИС РАПИД является универсальным инструментом прогнозирования и поддержки принятия решений.

В настоящее время одним из направлений развития ГИС РАПИД стало решение вопросов обработки, анализа и интерпретации материалов космических съемок. В результате в рамках системы была создана специальная подсистема СЕГМЕНТ (рис. 2).

Подсистема обеспечивает предварительную обработку космических снимков, их сегментацию, выделение линейных, дуговых и колышевых структур, а также ряд процедур анализа линеаментных сетей. Поскольку подсистема СЕГМЕНТ интегрирована в среду ГИС РАПИД, интерпретатор получает возможность использовать результаты работы подсистемы в процедурах классификации, распознавания, ранжирования искомых геологических объектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Большинство задач, решаемых при помощи инструментария ГИС РАПИД, базируются на выделении участков земной коры, благоприятных по своим структурным особенностям для размещения искомых объектов. Решение таких задач, традиционно

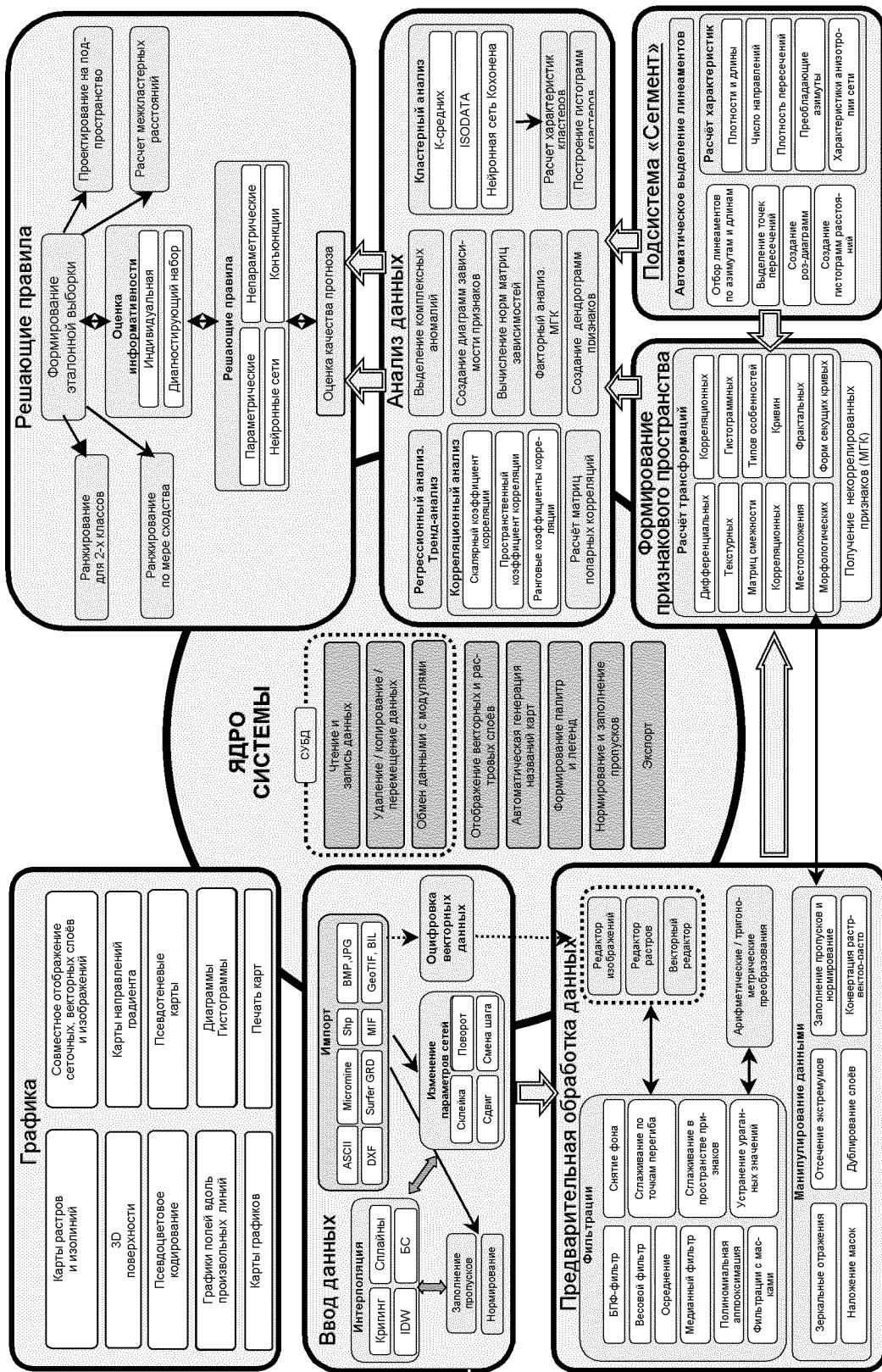


Рис. 1. Структурная схема ГИС РАПИД

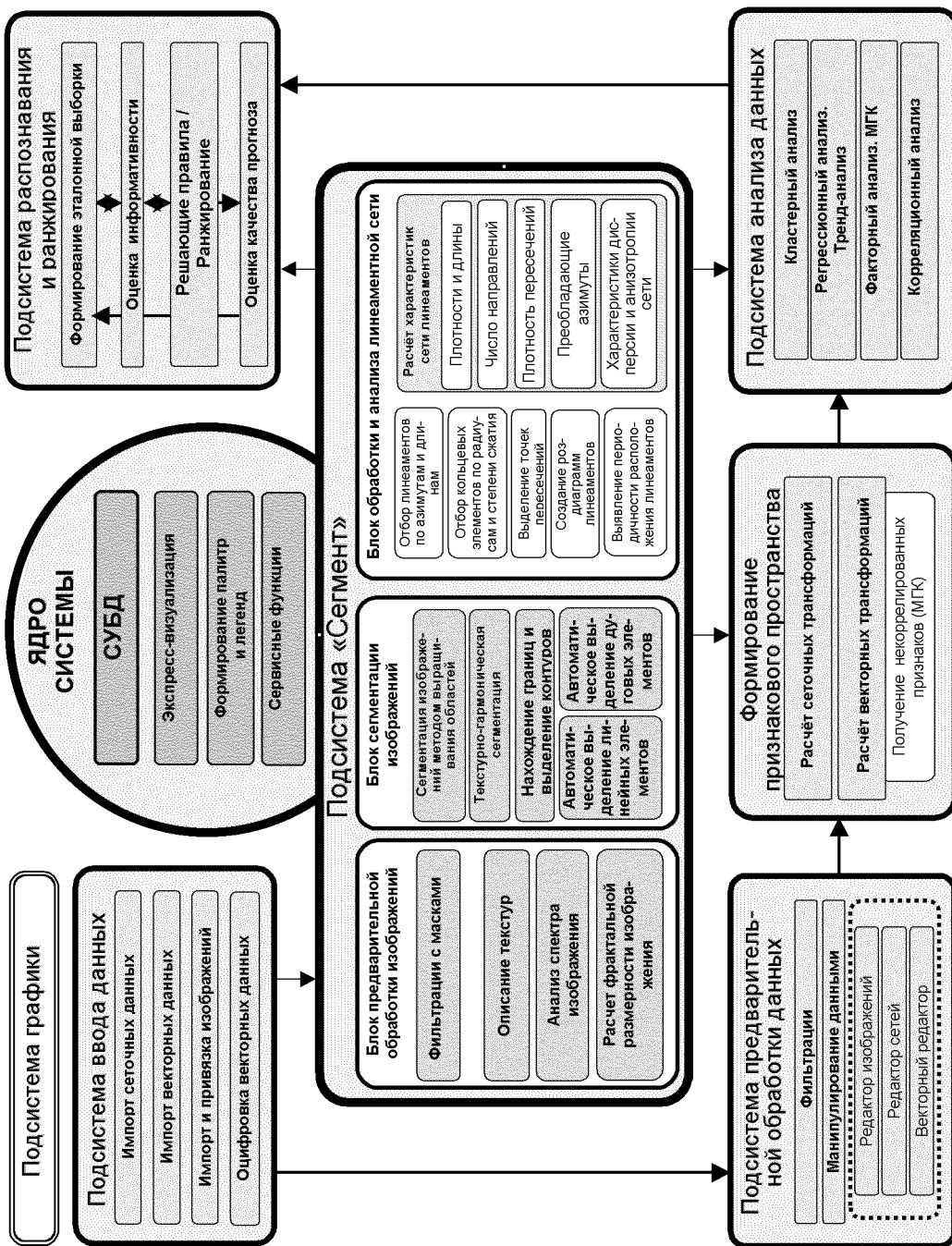
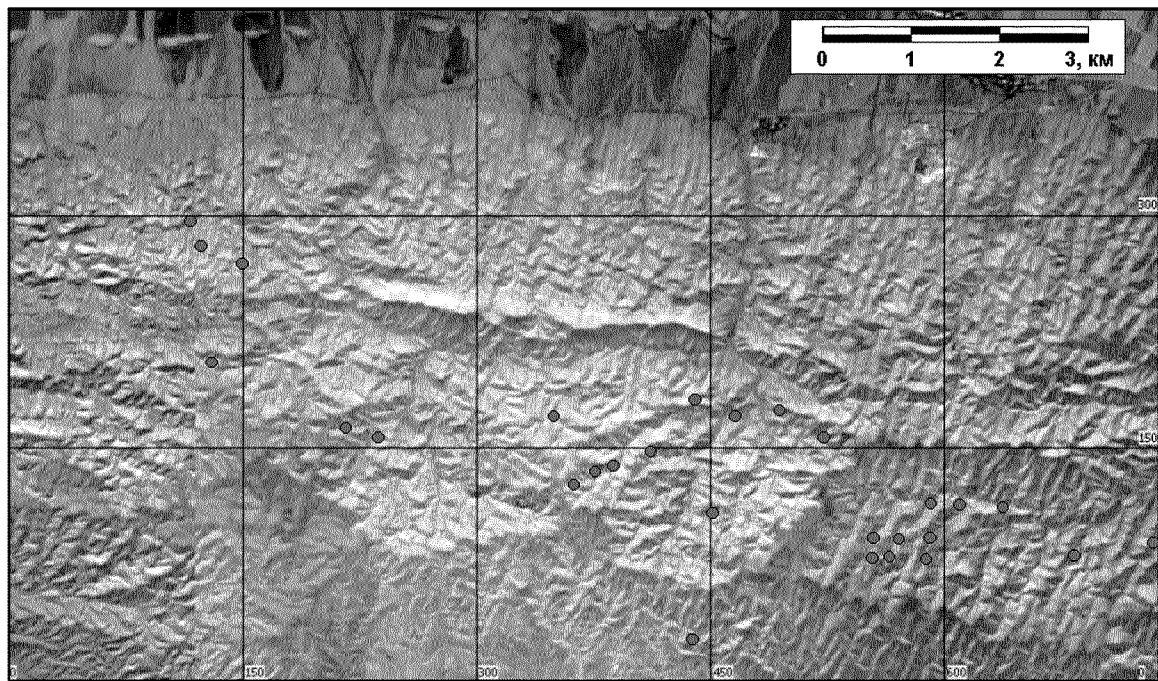


Рис 2. Структурная схема подсистемы СЕГМЕНТ

a

- Центры известных рудных объектов

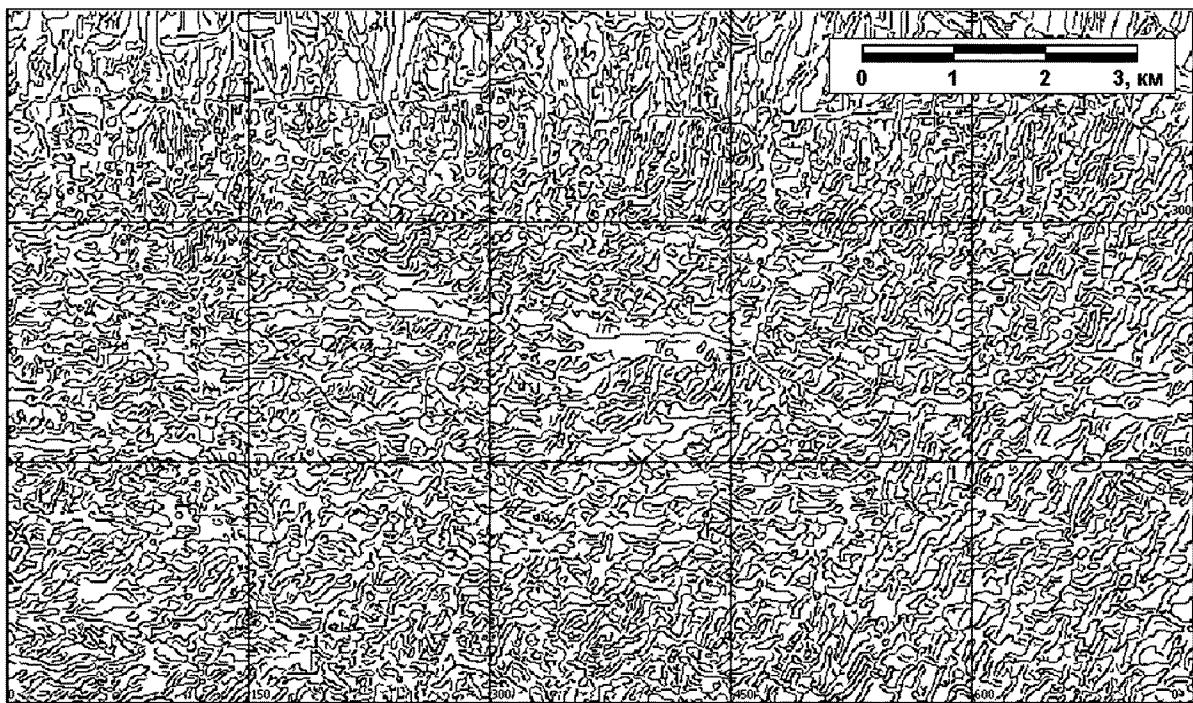
б

Рис. 3. *а* — панхроматический космический снимок рудного поля (спутник SPOT-4, разрешение 10 м); *б* — результат выделения границ яркости методом идеального детектора Capnu

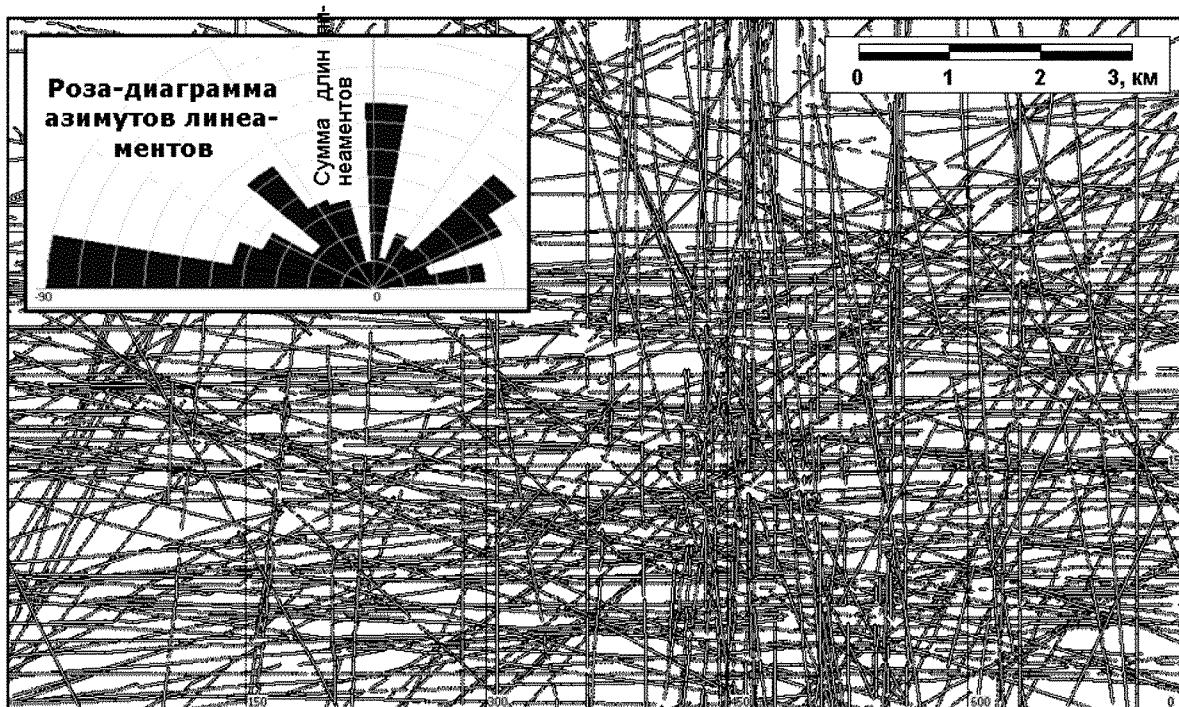


Рис. 4. Схема сквозных линеаментов и роза-диаграмма их азимутов

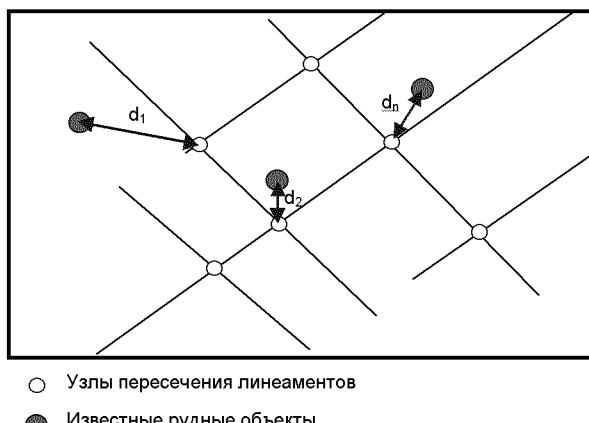


Рис. 5. К вычислению среднего расстояния от каждого известного рудного объекта до ближайшего узла

требующих выполнения большого объема дорогостоящих горных работ и трудоемких геологического-геофизических съемок, может быть упрощено путем привлечения материалов космических съемок и выполнения специальных процедур линеаментного анализа.

ГИС РАПИД была опробована при проведении прогнозно-поисковых работ с использованием космических материалов на ряде золоторудных место-

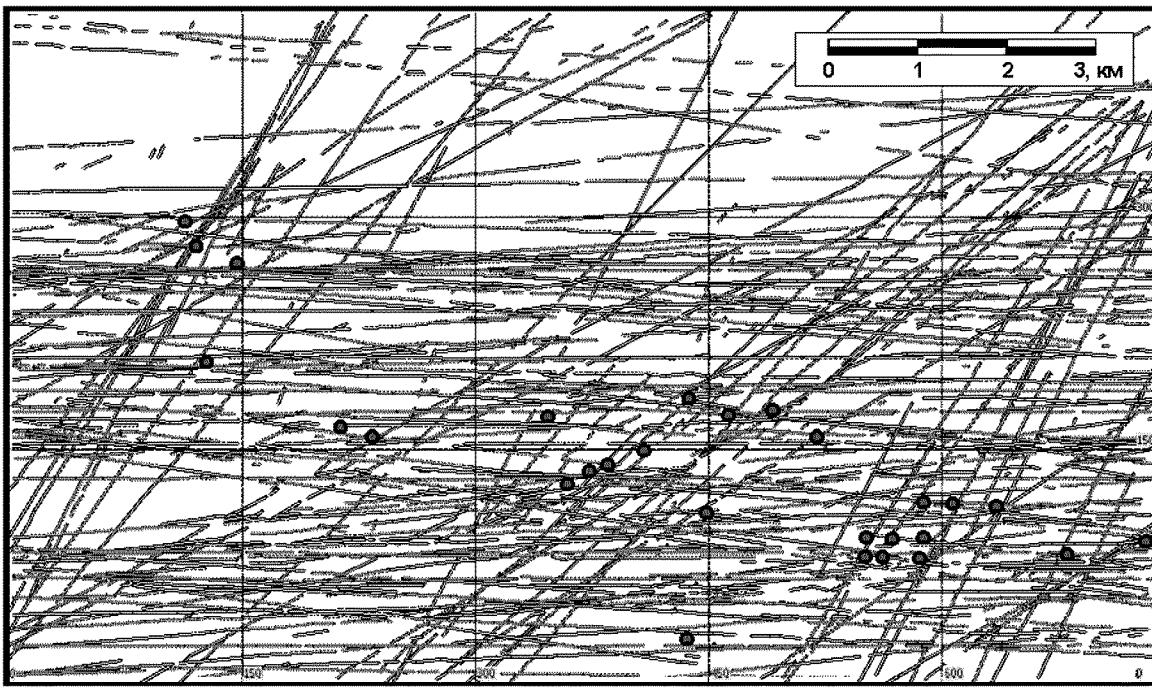
рождений в Украине и за рубежом [24]. В настоящей работе рассматриваются методика и некоторые результаты применения подсистемы СЕГМЕНТ на одном из золоторудных полей Западного Узбекистана.

На изучаемой территории известен ряд рудных тел жильного типа, залегающих в породах поздне-палеозойского возраста на глубинах от 400 до 1-2 м и имеющих промышленное значение. Относительно малая мощность осадочной толщи повышает эффективность использования КС. В качестве исходных данных для проведения линеаментного анализа использовались панхроматические снимки со спутника SPOT-4 с разрешением 10 м (рис. 3, а).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходные космоснимки, конвертированные в базу данных ГИС РАПИД и географически привязанные, подвергались предварительной обработке — контрастированию, эквилизации гистограмм и удалению (подавлению) техногенных объектов (канав, дорог и т. п.).

Далее на обработанных снимках выполнялось автоматическое выделение линеаментов. Для этой цели в ГИС РАПИД используется оригинальная методика, отличная от реализованной в известном пакете LESSA [5, 7].



● Центры известных рудных объектов

Рис. 6. Схема линеаментов с азимутами $0 \pm 10^\circ$ и $45 \pm 10^\circ$

Кратко методика сводится к выполнению следующих операций. Вначале к снимку применяется аппарат выделения границ яркости методом «оптимального детектора» Cappu [6]. Выделение границ происходит путем свертки исходного зашумленного сигнала $f(x)$ с функцией $h(x)$ с асимметричным импульсным откликом, при этом амплитуда $f(x)$ равна нулю за пределами окна. Выделяемая граница находится в точке локального максимума свертки $f(x) \otimes h(x)$. Функция $h(x)$, называемая оптимальным оператором Cappu выбирается так, чтобы обеспечить единственность отклика на единичную границу, высокую точность определения границ и максимизацию отношения сигнал/шум для получения высокой вероятности обнаружения существующей границы и низкой вероятности выделения ложной границы. Результат выделения границ приведен на рис. 3, б.

Далее полученная карта границ яркости сканируется в автоматическом режиме в различных направлениях с малым шагом угла (от 1°). При этом выделяются спрямленные участки границ (штрихи), которые обычно соответствуют мелким дизъюнктивным нарушениям и частям более крупных разломов, группируясь в линеаментные зоны.

Подход с построением границ и последующим выделением их произвольно ориентированных ли-

нейных частей выгодно отличается от используемого в системе LESSA, где штрихи выделяются применением маски прямолинейного ступенчатого края, развернутого в одном из восьми фиксированных направлений.

На следующем этапе строятся сквозные линеаменты, пересекающие весь изучаемый снимок. Для этого полученная карта штрихов сканируется в различных направлениях и производится подсчет суммарной длины штрихов вдоль линий сканирования. Если суммарная длина превышает некоторое пороговое значение (например 90 % от общей длины линии данного направления в пределах исследуемого участка), то соответствующие штрихи выносятся на схему сквозных линеаментов, если нет — отбрасываются. Схема, отражающая расположение сквозных линеаментов на исследуемой площади и роза-диаграмма азимутов их простирации приведены на рис. 4.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Визуальный анализ полученных материалов показал, что на изучаемой территории золоторудные объекты жильного типа тяготеют к узлам пересечения разноориентированных разломов. В связи с

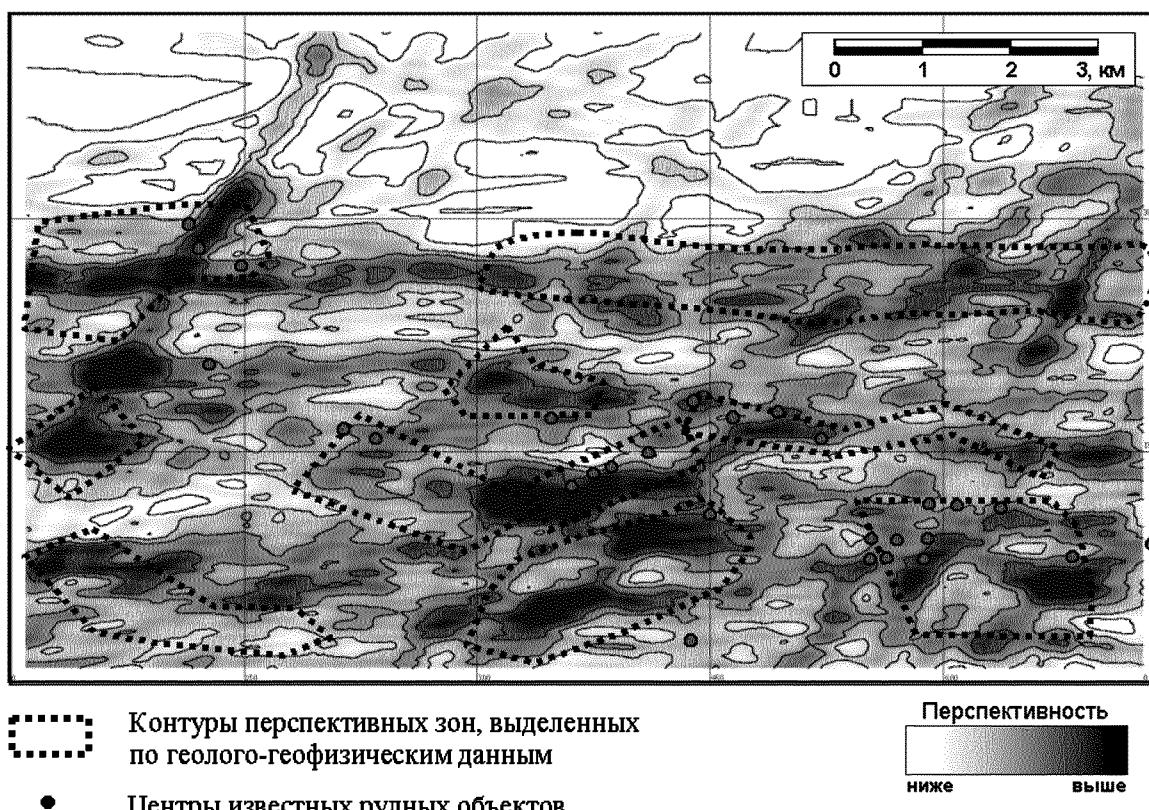


Рис. 7. Карта перспективности территории

Среднее расстояние от рудных объектов до ближайшего узла пересечения линеаментов указанных азимутов

Азимуты	Среднее расстояние, м
0 и 45°	720
0 и 90°	670
0 и 135°	2600
45 и 90°	265
45 и 135°	1960
90 и 135°	1040

этим в дальнейшем основное внимание уделялось изучению пространственных взаимоотношений разнонаправленных систем линеаментов и известных рудных объектов.

По розе-диаграмме найденных линеаментов были выделены преобладающие азимуты их простирации — 0, 90, 45 и 135° (рис. 4). Далее из общей массы линеаментов были сформированы четыре набора данных, включавших в себя только линеаменты

указанных направлений (в пределах $\pm 10^\circ$). Для различных попарных комбинаций разноориентированных линеаментов определялись узлы пересечения и вычислялось среднее расстояние от каждого известного рудного объекта до ближайшего узла (рис. 5), отражающее степень тесноты пространственной связи рудных объектов с узлами пересечения линеаментов различных направлений (таблица). Анализ таблицы показывает, что известные рудные тела тяготеют преимущественно к узлам пересечений линеаментов с азимутами $45 \pm 10^\circ$ и $90 \pm 10^\circ$ (рис. 6).

Построенная карта суммарной длины линеаментов указанных направлений в скользящем окне 0.5×0.5 км (рис. 7) отражает перспективность территории с позиций возможного обнаружения золотого оруденения.

Об эффективности описанной методики свидетельствует тот факт, что на карте только два из 28 известных рудных тел не попадают в зоны повышенных значений плотности соответствующих линеаментов.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее для этого же рудного поля был выполнен комплекс работ по прогнозированию перспективных зон с использованием картографических геологических материалов и геофизических съемок масштаба 1:50000 (гравитационного поля V_z , магнитных dT_a и Z_a , полей естественных электрических потенциалов, изоом и гамма-поля). При выделении перспективных зон преимущественно использовался метод аналогий, заключающийся в ранжировании территории по мере ее сходства с участками, содержащими рудные объекты, в многомерном пространстве геолого-геофизических характеристик.

Сравнительный анализ абсолютно независимых и разновременных результатов прогнозирования (с привлечением КС и по комплексу геолого-геофизических данных) показал, что прогнозные зоны, полученные в рамках обоих подходов, в целом весьма сходны и обеспечивают сопоставимое качество прогноза. На рис. 7 показаны контуры, выделенные по геолого-геофизическим данным на фоне карты перспективности, построенной по описанной методике. Существенное сходство результатов свидетельствует об эффективности обоих подходов. Однако при этом стоимость первичных материалов космических съемок значительно ниже, чем геолого-геофизических, а оперативность их получения существенно выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналогичные результаты были получены и на ряде других золоторудных полей, расположенных в горных районах с малой мощностью осадочного чехла. Это свидетельствует о перспективности подхода к прогнозированию, основанном на использовании материалов космических съемок, особенно в труднодоступных и геологически слабоизученных райо-

нах с открытым характером местности. В дальнейших исследованиях вероятно целесообразно привлечь мультиспектральные съемки в различных диапазонах спектра.

1. Бусыгин Б. С., Мирошниченко Л. В. Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании. — Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991.—168 с.
2. Бусыгин Б. С., Никулин С. Л., Бойко В. А. ГИС-технология поисков золота в Западном Узбекистане // Геоинформатика.—2006.—№ 1.—С. 44—49.
3. Бусыгин Б. С., Никулин С. Л., Залесский В. В. Компьютерная технология поисков золота на юго-западном склоне Украинского щита // Наука та інновації.—2006.—№ 2.—10 с.
4. Бусыгин Б. С., Никулин С. Л., Залесский В. В. Прогнозирование золоторудной минерализации в районе Сорокинской зеленокаменной структуры // Наук. вісник НГУ.—2006.—№ 3.—С. 68—72.
5. Короновский Н. В., Златопольский А. А., Иванченко Г. Н. Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исслед. Земли из космоса.—1986.—№ 1.—С. 111—118.
6. Pratt W. Digital image processing: 3ed. — Wiley, 2001.—366 p.
7. Zlatopolsky A. A. Texture orientation description of remote sensing data using LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) // Computers and Geosciences.—1997.—23, N 1.—P. 45—62.

THE USE OF RAPID GIS FOR GOLD MINERALIZATION PREDICTION ON THE BASIS OF SATELLITE DATA

B. S. Busygin, S. L. Nikulin, V. O. Boyko

Current state of space images usage problem in the geological study of the Earth's surface is considered. The principal information on the specialized geoinformation system RAPID and its SEGMENT module dedicated to image processing, analysis and interpretation are presented. We describe some methods for ore-gold mineralization prediction in an open mountain Uzbekistan region using lineament analysis of SPOT-4 satellite images. The prediction results obtained from satellite images are compared with geological and geophysical data.

УДК 528.88(550.814:553.98)

А. И. Архипов, З. М. Товстюк, В. И. Лялько,
М. А. Попов, Т. А. Архипова, Е. И. Левчик, Т. В. Осканьян

Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, Киев

Методические принципы поиска залежей углеводородов на суше с использованием аэрокосмической информации

Представлено 25.06.07

Описана методология дистанционного поиска залежей углеводородов на суше, в основе которой концепция комплексного подхода к сбору и компьютерной обработке аэрокосмической и геологической информации. Подчеркивается необходимость учета параметров других физических полей. Приведены результаты решения ряда нефтегазопоисковых задач на основе реализации принципов описанной методологии.

Соотношение между суммарным уровнем потребления нефти и газа в мире и общим объемом их добычи на сегодня и в обозримой перспективе таково, что поиск новых залежей углеводородов (УВ) относят к числу наиболее важных и актуальных задач для обеспечения жизнедеятельности человечества.

Однако время открытия «простых» в геологическом отношении месторождений УВ давно прошло. Сегодня поиск и разведку новых залежей чаще всего приходится вести в труднодоступных и малоизученных географических районах, а сами залежи могут располагаться на весьма больших глубинах. Эти обстоятельства приводят к существенному удлинению и увеличению сроков проведения необходимых нефтегазопоисковых работ, снижению эффективности традиционных методов поиска и разведки.

В этой связи активно прорабатываются и развиваются новые подходы к решению нефтегазопоисковых задач. Одним из перспективных направлений является оценка нефтегазоперспективности территорий с применением аэрокосмических методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). К их преимуществам относятся высокая оперативность, относительно низкая себестоимость, практическое отсутствие ограничений в географическом расположении изучаемой территории.

Основными геологическими задачами, решаемыми до недавнего времени с использованием аэрокосмических методов в производственном режиме, являлись выделение и изучение разрывных нару-

шений, блоковых полей и оценка их неотектонической активности, выявление локальных неотектонических аномалий, с которыми связаны нефтегазопоисковые объекты различных морфогенетических типов, а также некоторые другие задачи. Сегодня, благодаря постоянному совершенствованию дистанционных методов, существуют реальные предпосылки для решения еще более сложных в геологическом отношении задач поиска промышленных скоплений УВ [11].

Некоторые исследователи при оценке нефтегазоперспективности исследуемых территорий ограничиваются только аэрокосмической информацией, связывая различные яркостные аномалии и геометрические (пространственно-статистические) структуры на аэрокосмическом изображении с возможным наличием залежей УВ. В основе таких связей могут лежать как известные, так и новые, оригинальные модели геологических процессов. Конечно, такой подход позволяет свести к минимуму финансовые и временные затраты на принятие решений для постановки детальных нефтегазопоисковых работ. Однако гарантировать при этом точность принимаемых решений и прогнозов довольно трудно.

Более перспективным является другой подход, при котором решения о возможном наличии залежей УВ на изучаемой территории принимаются на основе комплексного анализа информации, получаемой геологическими, геофизическими, аэрокосмическими и другими методами. На этом пути ключевыми вопросами являются следующие: какими именно физическими методами можно и следует

ограничиться, насколько обоснованными и информативными являются используемые дешифровочные признаки при анализе аэрокосмических изображений для выявления залежей УВ, каким образом наиболее рационально комплексировать собранную информацию и принимать соответствующие решения, как оценить достоверность (или ошибку) прогноза?

Конструктивные ответы на большинство этих вопросов содержатся в методиках и технологиях поиска залежей УВ, разработанных и постоянно совершенствуемых в течение последних 15 лет в Научном центре аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины (ЦАКИЗ) [9–11].

В основу данных разработок положены следующие методические принципы:

- считается доказанным существование генетической связи залежи УВ с элементами ландшафта;
- исходной для анализа и приоритетной при принятии решений считается геотектоническая (разломно-блоковая) информация;
- обязательным элементом является ретроспективный анализ изучаемой территории по аэрокосмическим данным разного пространственного разрешения, полученным в различных спектральных диапазонах;
- использование в статистически необходимых объемах контрольно-калибровочной информации;
- региональная адаптация технологии;
- привлечение современных математических, алгоритмических и экспериментных методов для анализа исходной информации и принятия решений;
- объективная оценка достоверности принимаемых решений.

Раскроем кратко суть выше перечисленных принципов.

Теоретические и экспериментальные исследования закономерностей прямого и опосредованного влияния залежей углеводородов на ландшафт позволяет сделать вывод, что почти над всеми месторождениями УВ существуют аномальные зонально-кольцевые поля разного генезиса. При этом интенсивность нафтогенных явлений в верхней зоне зондирования определяется совокупным влиянием химических (термокатализитическая деструкция органического вещества, нарушение карбонатного равновесия, влияние оксидов Fe и пр.), биохимических (для аэробных и анаэробных бактерий и других микроорганизмов), физико-химических (миграция УВ, их диффузия, сорбция, растворение и прочие), физических (термо-, грави-, магнито-, радиоаномалий) процессов и в определенной мере зависит от плотности пород осадочного чехла [4]. Опыты обнаруживают приуроченность фильтрационных процессов к тектонически-послабленным зо-

нам (разломов, крыльев и периклинальных участков структуры), тогда как диффузные процессы достигают максимальных значений в сводчатых частях структур. Эти процессы переноса энергии (в том числе тепла, жидких, парообразных и газообразных флюидов) приводят к ощущимой трансформации физико-химического состояния пород и грунтов над залежами УВ и в зонах разуплотнения пород, которая, в свою очередь, оказывает содействие формированию в корнеобитаемом и приземном слоях данных территорий специфических едафо- и температурных условий для роста и развития макро- и микробиоты. Есть основания предполагать, что вследствие совокупного влияния этих факторов на элементы дневной поверхности изменяются спектральные характеристики оптического поля ландшафта, но степень влияния каждого из факторов может быть разной, поэтому и набор информативных факторов может изменяться в зависимости от размеров исследуемой площади.

Растительный покров, тесно связанный со средой обитания, несет интегральную информацию об особенностях этой среды. Эта информация может быть зарегистрирована дистанционно, оптическими методами без нарушения целостности покрова по отражательным и флуоресцентным характеристикам объектов. Связь этих характеристик с физиологическим состоянием растений и грунтов описана, например, в [1–3, 5, 8]. Имеются данные, что отражательная способность растений и растительного покрова в целом в видимой области спектра зависит от поглощения солнечной радиации растительными пигментами и, в первую очередь, хлорофиллом (зелеными пигментами). В ближней инфракрасной (ИК) зоне отражательная способность растений и растительного покрова зависит от особенностей строения тканей листа, в средней ИК-зоне — от степени оводненности клеток и тканей растений. Выявлены также изменения спектров индуцированной лазером флуоресценции в связи с условиями минерального питания, наличием в среде выращивания высоких концентраций ионов тяжелых металлов, действием ряда экологических факторов [8]. Таким образом, возможна регистрация специфических признаков залежей УВ по соотношению оптических параметров растительного покрова.

Для почв основными факторами, определяющими их оптические характеристики, являются минеральный состав, степень окисленности железа, содержания гумуса и увлажненность, которые имеют место над залежами УВ, а для растений, кроме этого, кислотно-щелочной показатель pH, окислительно-восстановительный потенциал Eh, минеральный и газовый состав почв, а также температурный фактор.

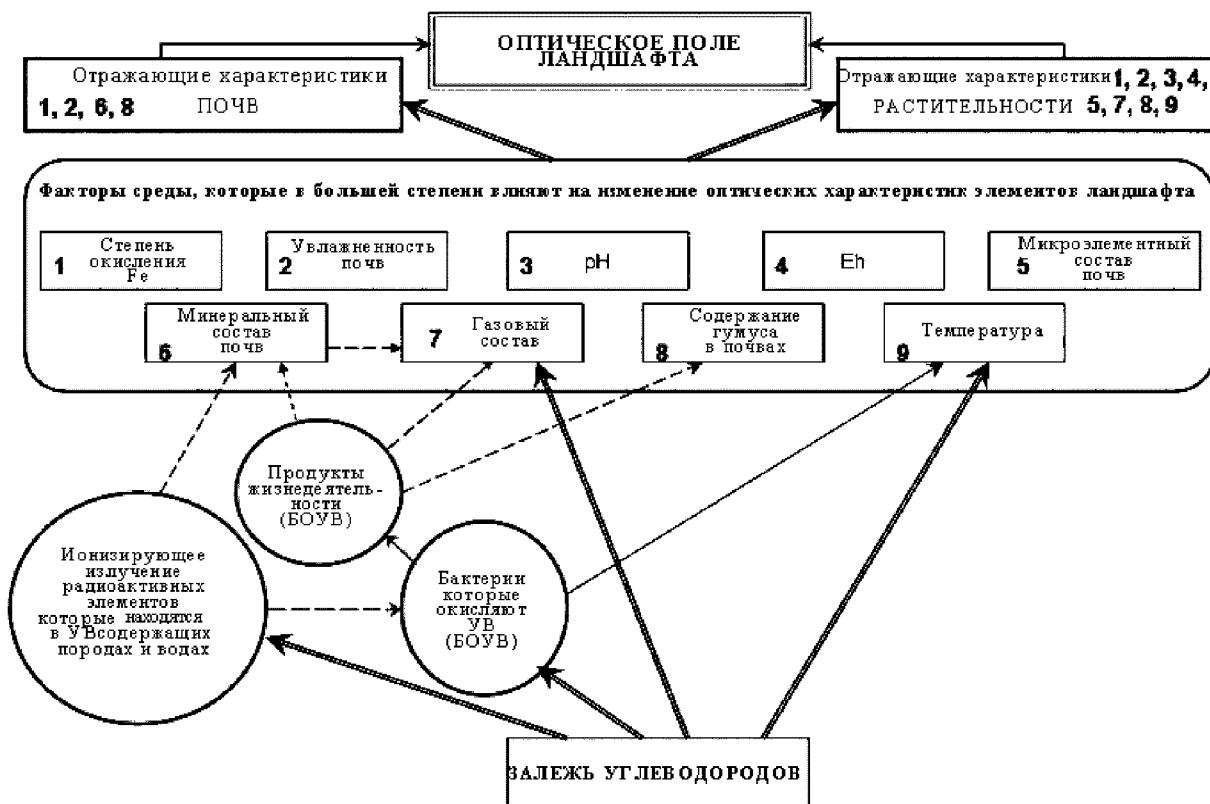


Рис. 1. Модель формирования аномалий оптического поля над залежами УВ [1]: 1 — изогипсы отражающего горизонта Vs2; 2 — изогипсы отражающего горизонта Vb2; 3 — разрывные нарушения (по данным сейсморазведочных работ); 4 — газовые скважины (пробурены после проведения наших исследований): а) продуктивные, б) непродуктивные; 5 — газовые скважины продуктивные (пробурены до проведения наших исследований); 6 — оптические аномалии, выделенные по данным ДЗЗ; 7 — линеаменты (зоны напряжено-деформированного состояния литосфера)

В результате проведенного анализа факторов среды, которые влияют на дневную поверхность ландшафта, в частности, на его отдельные элементы (почвы, растительность), может быть предложена следующая концептуальная модель формирования аномалий оптического поля над залежами УВ (рис. 1). Здесь двойные стрелки отражают непосредственное влияние залежей УВ, а также факторов среды на составляющие почв или растительности. Тонкие и штриховые стрелки обозначают опосредованное влияние, которое приводит к определенной трансформации свойств среды над залежью УВ. Анализ закономерностей данных факторов, которые проявляются в наличии нафтогенных процессов над залежами УВ, рассмотрены в работе [2].

Важнейшее значение при нефтегазопоисковых работах имеют разломы как геофизико-динамические структуры, с которыми связано большинство месторождений Днепровско-Донецкой впадины.

Вместе с разломами нефтегазоносные структуры образуют в этом регионе прогнозные структурно-тектонические зоны.

Многолетний опыт дешифрирования показывает, что на снимках значительная часть разломов как зон линейного напряжения земной коры, в пределах которой различные физические поля изменяют свои свойства, обуславливая этим аномалии оптических характеристик элементов ландшафта, интерпретируются как линеаменты. Поэтому изучение и уточнение разломно-блочного строения и неотектонической активности исследуемого региона имеют важное практическое значение. Наличие неотектонических блоков в благоприятных лиофациальных условиях с непроницаемыми покрышками создает благоприятные условия для нефтегазонакопления [2, 13, 17]. Изучение и уточнение разломно-блочного строения заданной территории с применением материалов многоспектральной аэрокосмической съемки позволяет выделить наи-

более активные неотектонические блоки и геофлюидодинамические структуры. Наличие таких структур может косвенно указывать на нефтегазоперспективность исследуемых площадей [2, 16].

В процессе изучения оптического поля ландшафта исследователи сталкиваются с проблемой выбора наиболее целесообразных с точки зрения информативности условий аэро- или космической съемки: периода вегетации растительного покрова, пространственного и спектрального разрешения применяемой аппаратуры, учета влияния техногенной нагрузки на ландшафт. Как показывают проведенные исследования, съемки наиболее целесообразно выполнять в периоды начала и конца вегетации растительного покрова [2, 3, 8].

Поскольку в диапазоне длин волн от 0.4 до 0.9 мкм яркостные различия между аномальными участками и фоном часто находятся вблизи порога чувствительности существующих систем формирования изображений, то возникает задача выделения малоконтрастных аномальных участков. Один из подходов к ее решению базируется на методе спектральных контрастов [13]. Его суть состоит в анализе информации, получаемой при изучении яркостных различий между объектом и фоном в узких зонах спектра, а также спектров флуоресценции и флуоресцентных параметров растительного покрова.

В общем случае задача выделения выявления оптических аномалий ландшафта является статистической. Для заверки результатов аэрокосмогеологических исследований, выполненных в камеральных условиях, исследуют спектральные отражающие свойства растительности и почв в зоне залежи УВ, так и вне ее. При этом достоверность принимаемых решений напрямую зависит от объемов получаемой таким образом исходной и заверочной информации. Используемый подход к определению статистически корректного объема такой информации описан в [14].

Практика показывает, что эффективность технологий ДЗЗ оказывается не одинаковой в разных геолого-геофизических и ландшафтных условиях. Поэтому непременным условием является проведение исследований по адаптации технологии к району исследований. В этой связи необходимо отметить, что в районах с высокой аграрной освоенностью, где значительно нарушены естественные ландшафты, применение указанного выше подхода при нефтегазопоисковых работах осложнено отсутствием однородных фаций и высокой техногенной нагрузкой. Наиболее благоприятными для использования метода дистанционного зондирования являются девственные ландшафты с ненарушенными фациями. Поэтому в каждом конкретном районе необходимо четкое выделение однородных фаций

ландшафта с целью изучения их оптических характеристик и выявления «аномалий типа залежь» (АТЗ).

Анализ результатов геолого-геофизических и дистанционных исследований для принятия решений о наличии либо отсутствии АТЗ проводятся методом последовательного слияния информации (Data Fusion), предполагающим использование количественных оценок достоверности [15]. Для обработки полученной информации используются стандартные программные продукты Statistic, Surfer, Excel, а также разработки авторов «Эксперимент-2», «Эксперимент-3», «Эксперимент-4».

Технология предполагает проведение оценки достоверности принимаемых решений. Такая оценка проводится либо путем испытаний на территориях, нефтегазовые активы которых известны, либо может быть получена по результатам непосредственного бурения. Получение необходимых количественных оценок достоверностей и точности выполняется путем построения матрицы ошибок (eggog matrix) [14].

Рассмотренные выше методические принципы являются базовыми для разработанной в ЦАКИЗ технологии поиска залежей УВ на сушке с использованием аэрокосмической информации. Она является результатом многолетней совместной работы геологов-нефтяников, физиков-оптиков, биологов, геоморфологов, математиков и других специалистов [6, 12]. Данная технология поиска залежей УВ защищена патентами Украины UA № 63073 и UA № 56475 [9, 10]. Она прошла апробацию в различных геологических и ландшафтных условиях как в Украине, так и на территориях зарубежных стран. С ее помощью успешно решались следующие нефтегазопоисковые задачи:

- ранжирование нефтегазопоисковых объектов по критерию продуктивности, ранее подготовленных с использованием различных геологических и геофизических методов (Западная Сибирь, Татарстан, Пермское Прикамье);
- уточнение внешнего контура нефтегазоносности, в особенности для залежей УВ, характеризующихся гетерогенным строением природных резервуаров: тектонические блоки, литофацальные изменения и др. (Украина);
- оперативная оценка нефтегазоперспективности малоизученных площадей на этапе, предшествующем их вводу в поисковое бурение (Украина, Объединенные Арабские Эмираты).

Известно, что в настоящее время при использовании набора классических методов, успешность бурения поисково-разведочных скважин не превышает 33 % [7]. Поэтому каждое новое решение, позволяющее повысить этот показатель, дает значительный экономический эффект (бурение одной

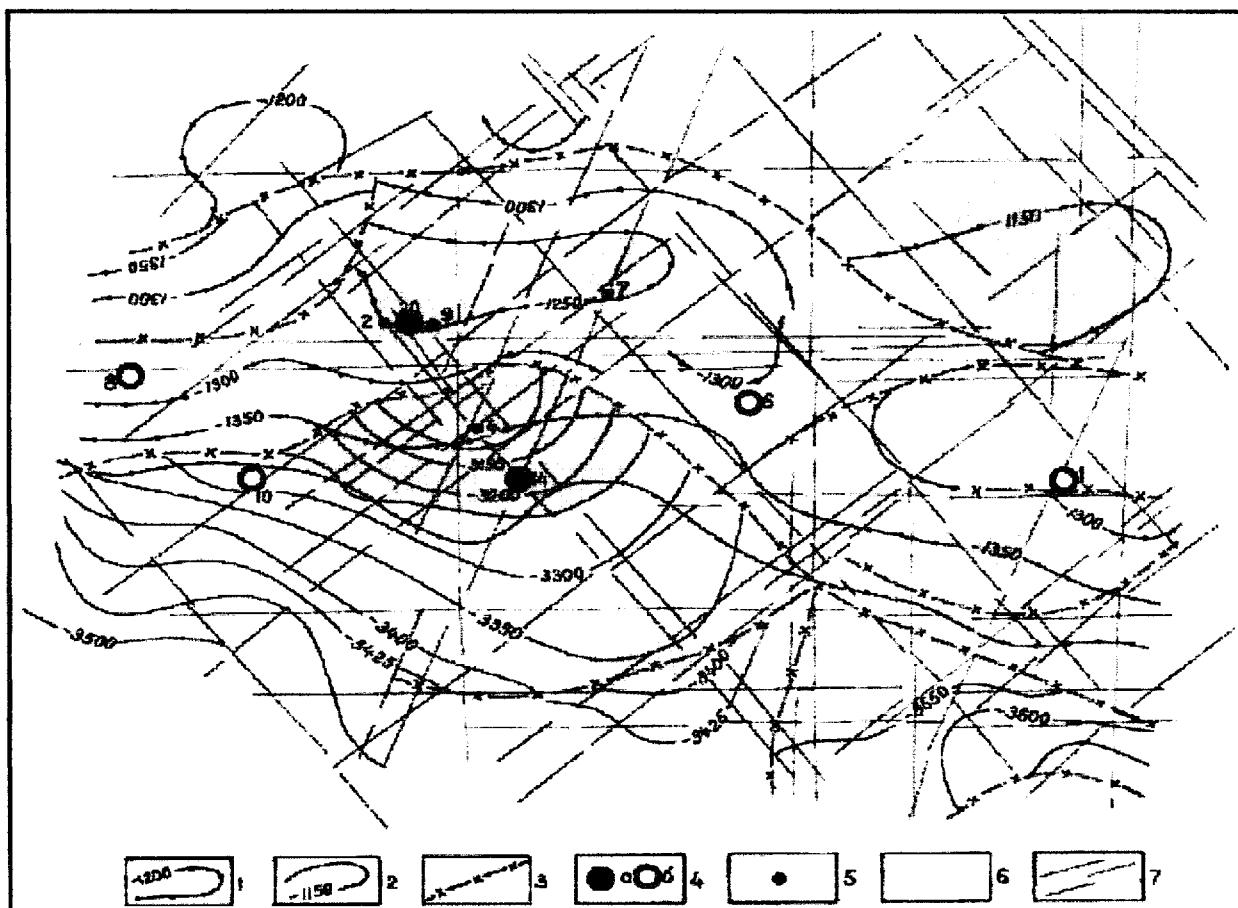


Рис. 2. Результаты апробации технологии на Евгеньевской площади (Днепровско-Донецкая впадина)

поисковой или разведывательной скважины составляет от 10 до 20 млн гривен). Предлагаемая технология с момента ее создания в начале 1990-х годов по настоящее время использовалась на 146 нефтегазопоисковых объектах, 76 из которых были проверены бурением. В различных геологических и ландшафтных условиях подтверждаемость прогнозов составляла от 76 до 82 %. Поисковые объекты — залежи УВ — располагались на глубинах от 1500 до 5000 м.

Основное содержание работ, предусмотренных данной технологией:

- фотометрирование материалов аэрокосмической съемки, выполненной в видимом и ближнем ИК-диапазонах электромагнитного спектра, и обработка их результатов;
- полевые работы на объекте исследования (фотометрирование образцов растительности и почв,

магнитометрические, в том числе педометрические, и литогеохимические исследования);

— принятие решений о выявлении / отсутствии АТЗ.

В качестве исходных данных предполагается использование материалов многоспектральной аэро- и космической съемки территории с пространственным разрешением на местности не хуже 30 м.

Целью фотометрирования видеоизображений, получаемых по результатам многоспектральных аэрокосмических съемок, и проведения комплекса полевых работ на объектах исследования является выявление оптических аномалий, обусловленных изменением различных физических полей над залежами УВ. Фотометрирование может быть выполнено с помощью стандартных программных продуктов ERDAS либо ENVI. В ЦАКИЗ для этой цели разработана и используется авторская программа

«Oil». В полевых условиях фотометрирование растительного покрова выполняется фотометрами ПФ-08 и КФ-08м (разработки ЦАКИЗ). Спектрофотометрирование образцов листьев растений и проб почв выполняется с использованием спектрофотомера СФ-1.

В качестве конечного информационного продукта выдаются картосхемы с выделенными аномальными участками над залежами УВ. В качестве примера на рис. 2 показана карта с результатами проведенных исследований на Евгеньевской площади в 2002 г. Следует отметить, что продуктивные скважины №№ 14 и 20 расположены в пределах оптических аномалий, а непродуктивные №№ 1, 6, 8, 10 — за их пределами (все данные скважины были пробурены после проведенных нами исследований).

Таким образом, в настоящей статье:

- сформулированы основные методические принципы поиска залежей УВ с использованием материалов аэрокосмических съемок;
- предложена модель формирования яркостных аномалий основных элементов ландшафта, которая поясняет формирование полезного сигнала, регистрируемого методами ДЗЗ;
- обоснована необходимость использования многоспектральной съемки (в узких зонах спектра) растительного покрова для решения нефтегазопоисковых задач;
- приведены примеры решения нефтегазопоисковых задач с использованием описанной технологии в различных геологических и ландшафтных условиях.

1. Архіпова Т. О. Попередні результати геохімічних та дистанційних досліджень ландшафтів при розв'язанні нафтогазопошукових задач // Пощукова та екологічна геохімія.—2004.—№ 4.—С. 77—80.
2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — К.: Наук. думка, 2006.—357 с.
3. Выгодская Н. Н., Горшкова Н. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. — Л.: Недра, 1987.—248 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 № 234 от 24.07.80 г.
5. Коубей С. Н., Кобец Р. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — К.: Наук. думка, 1990.—136 с.
6. Левчик О. І., Архіпов О. І., Товстюк З. М. Використання методу лазерної флуоресцентної фітоіндикації при нафтогазопошукових роботах // Вісник НДУ ім. Т. Шевченка. Сер. Геологія.—2000.—№ 5.—С. 23—25.

7. Лукин А. Е. Прямые поиски нефти и газа: причины неудач и пути повышения эффективности // Геолог України.—2004.—№ 3.—С. 18—43.
8. Мовчан Л. И., Каневский В. А., Семичаевский В. Д. и др. Фітоіндикація в дистанційних исследованиях. — К.: Наук. думка, 1993.—305 с.
9. Патент на винахід UA № 56475A, 7601V9/00. Структурно-геодинамічний спосіб прогнозування зон розвитку високопроникних порово-тріщинних колекторів / Перерва В. М. — Держ. департамент інтелектуальної власності.—Бюл. № 5.—Опубл. 15.05.2003 р.
10. Патент на винахід UA № 63073A. Мультиспектральний структурно-польовий спосіб прогнозування покладів нафти і газу / Перерва В. М., Тепляков М. О., Архіпов О. І. та ін. — Опубл. 15.01.2004.
11. Перерва В. М., Архіпов А. І., Бусел Г. Ф. и др. Состояние и пути совершенствования спутниковой технологии прогнозирования залежей нефти и газа // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 201—206.
12. Перерва В. М., Левчик Е. И., Архіпов А. І. Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—2002.—С. 187—197.
13. Перерва В. М., Лялько В. И., Архіпов А. І. и др. Прямой поиск залежей нефти и газа дистанционными методами (предварительный опыт, перспективы развития). — К., 1995.—83 с.—(Препринт / ЦАКИЗ НАНУ).
14. Попов М. А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях // Проблемы управления и информатики.—2007.—№ 1.—С. 97—103.
15. Попов М. А., Лялько В. И., Подорван В. Н., Сахацкий А. И. Методика классификации площадных объектов на многоспектральных космических изображениях на основе последовательного слияния информации // Материалы Второй открытой Всероссийской науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 2005.—С. 88—94.
16. Товстюк З. М. Прогноз локальных структур по аэрокосмогеологическим исследованиям в Днепровско-Донецкой впадине: Автoref. дис. канд. геол.-мин. наук. — М., 1987.—20 с.
17. Чабаненко І. І., Гожик П. Ф., Краюшкін В. О. та ін. Нафтогазоперспективні об'єкти України // Перспективи нафтогазоносності бортових зон западин України. — К.: ДП МОН «Віснік видавництво України «Варта», 2006.—264 с.

REMOTE SENSING BASED METHODOLOGY FOR ONSHORE HYDROCARBONS FIELD ACQUISITION

*A. I. Arkhipov, Z. M. Tovstyuk, V. I. Lyalko, M. A. Popov,
T. A. Arkhipova, E. I. Levchik, T. V. Oskan'yan*

Remote sensing based methodology for onshore hydrocarbons field acquisition is described. The complex approach to gathering and computer processing of the aerospace and geological information is proposed. Necessity of allowing for other physical fields is emphasized. The results of the decision of some oil and gas problems with the use of methodological principles under consideration are given.

УДК 558.88:[550.81:528.94]

Н. В. Пазинич

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України

Геоморфологічні дослідження на основі матеріалів дистанційного зондування Землі при створенні Держгеолкарти-200

Представлено 25.06.07

Представлено результати геоморфологічних досліджень із застосуванням космічних знімків та цифрових моделей рельєфу. Дані, отримані на основі застосування цифрових моделей рельєфу як основи для системного узагальнення розрізнених геолого-геоморфологічних матеріалів, дозволили провести палеореконструкцію розташування плейстоценових перигляціальних озерних басейнів на основі вираженості у рельєфі давніх берегових ліній.

Геоморфологічні, структурно-геоморфологічні дослідження та складання геоморфологічних карт є обов'язковою складовою, передбаченою комплексом робіт з укладання Держгеолкарти-200. Достатньо актуальним є впровадження комп'ютерних технологій та використання матеріалів дистанційного зондування Землі (МДЗЗ) у геолого-пошукові роботи. Дослідження проводились на аркушах Центрально-Української та Дніпрово-Донецької серії (М-35-IV, М-35-V, М-35-VI), розташованих у північно-західній частині Українського щита (УЩ) у зоні зчленування з Прип'ятською западиною і перспективних на пошуки ряду корисних копалин. За фізико-географічними умовами територія аркушів належить до зони мішаних лісів Поліських ландшафтів. За геолого-геоморфологічними дешифрувальними критеріями північний захід УЩ відноситься до закритих регіонів, по-перше за рахунок покриву осадових відкладів і по-друге — за рахунок широкого розвитку деревної рослинності. Застосування МДДЗ дало змогу укласти геоморфологічну карту із максимальним ступенем детальності, і надалі — використати її як основу для карти четвертинних відкладів.

Базовим матеріалом, на якому проводилося дешифрування, був спектрозональний космічний знімок (КЗ) LANDSAT. Використовувались не тільки окремі канали, але й синтез декількох каналів з обов'язковим зачлененням теплових каналів. Саме синтезовані знімки є найбільш інформативними при вирізненні від'ємних заболочених форм рельєфу та акумулятивних еолових пасом, широко поширеніх у Поліських ландшафтах. Окрім топо-

графічних матеріалів, вперше при роботах такого типу було використано цифрові моделі рельєфу (ЦМР). Залучення цифрових моделей, формування тривимірних (3D) моделей, комбінування зі знімками високого розділення дозволяє одержати високореалістичні зображення рельєфу. В основу ЦМР покладено дані радіолокаційного космічного знімання. Матеріали ЦМР несуть у собі інформацію, притаманну як космічним знімкам, так і топографічним картам, і мають певні переваги перед ними. Ці моделі рельєфу позбавлені мозаїчної структури, притаманної КЗ, і можуть трансформуватися у тривимірне об'ємне зображення. Мозаїчна структура зображення КЗ, зумовлена, як правило, аграрною діяльністю, вуалює природні особливості ландшафтів і утруднює процес дешифрування та виявлення природних пошукових об'єктів. У порівнянні з топографічними картами ЦМР вигідно вирізняються оглядовістю, генералізацією, детальністю і об'ємністю зображення (рис. 1).

На рис. 1 зображено фрагмент ЦМР північно-західної частини території дослідження. Достатньо чітко виділяються плоскі понижені ділянки та підвищені, структуровані ділянки у південно-східній частині. Оптимізація використання новітніх МАКЗ досягається використанням комп'ютерних технологій. Новітні технології спонукають, окрім того, до формування нових наукових підходів бачення особливостей геоморфологічної будови територій, генезису та історії формування рельєфу. У результаті комплексних досліджень виділено декілька різновисоких рівнів воднольодовикової рівнини, деталізовано структуру гідромережі та інших накладе-

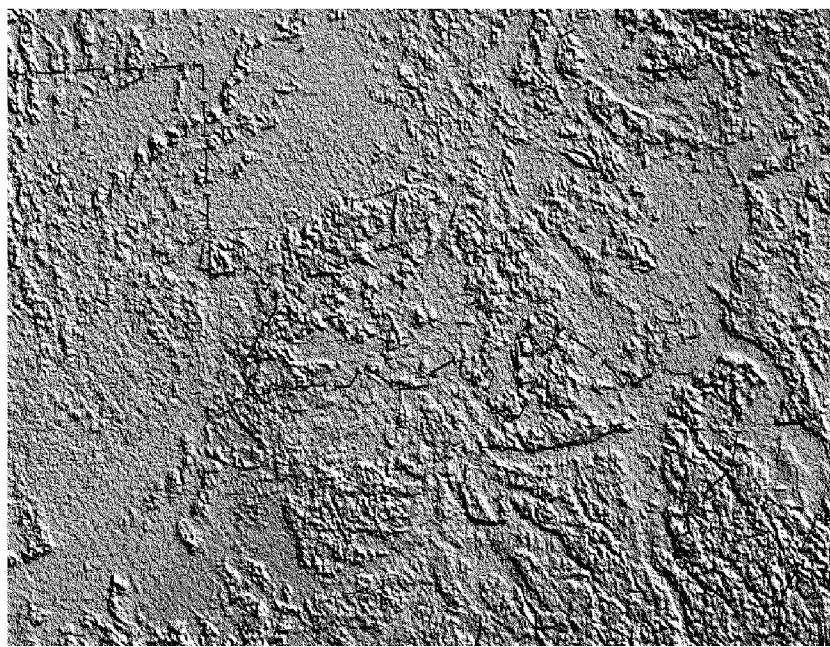


Рис. 1. Фрагмент цифрової моделі рельєфу північно-західної частини району досліджень

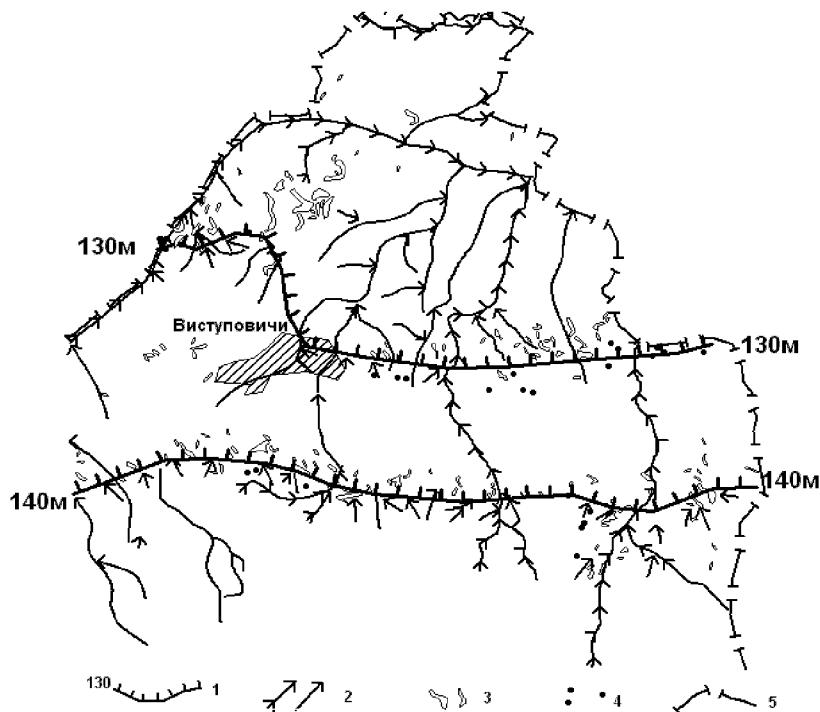


Рис. 2. Детальна ділянка досліджень: 1 — гіпсометричні «ступені», 2 — постійні та тимчасові водотоки, 3 — акумулятивні еолові пасма, 4 — мікрозападини, 5 — державний кордон

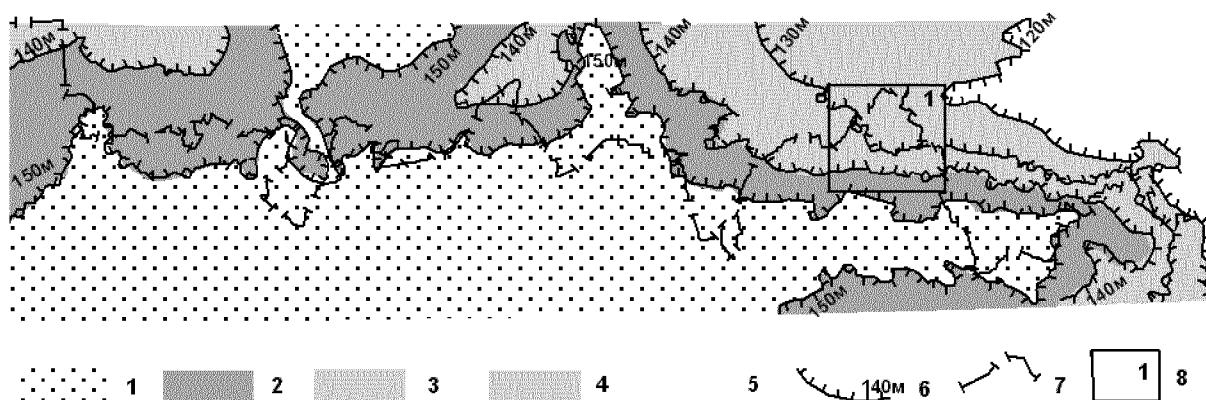


Рис. 3. Схема палеореконструкції перигляціальних плейстоценових озерних басейнів (за даними МДЗЗ). Умовні позначення: 1 — суходоли, 2—5 — різновікові озерні басейни, 6 — гіпсометричні перегини, 7 — державний кордон, 8 — ділянка детальних досліджень (с. Виступовичі)

них форм рельєфу.

При дешифруванні та дослідженні акумулятивних рівнів воднольодовикової рівнини привернули на себе увагу своєрідні перегини поверхні, які умовно можна назвати «гіпсометричними ступенями». Ці «ступені» простежуються фрагментарно, мають в основному вигляд субширотних смуг шириною до 1 км і проявляються, окрім збільшення нахилів поверхні, через скupчення накладених форм рельєфу. У межах цих перегинів спостерігається розвиток невеликих пологих ерозійних форм, часто з мікрозападинами у верхів'ях, а біля нижньої частини «ступені» — розповсюдження незначних за розмірами акумулятивних еолових форм. Виходячи з цього комплексу згрупованих форм рельєфу, можна припустити, що ми маємо справу з береговою лінією озера вздовж базису еrozії якого розвивалися еrozійні форми. Існування мікрозападин теж свідчить про наявність і близькість базису денудації. Еолові форми у нижній частині перегину сформувалися на піщаних прибережних відмілинах на етапі спуску озер (рис. 2).

На рис. 2 зображені результати дешифрування КЗ LANDSAT ділянки у районі с. Виступовичі. Гіпсометричні «ступені» відповідають абсолютним позначкам 130 та 140 м. У їхніх межах спостерігається значна кількість «сліпих» еrozійних форм, еолові пасма та мікрозападини.

За даними багатьох дослідників у плейстоцені у межах Прип'ятської западини існували постльодовикові озера дніпровського та валдайського віку. На думку Д. Соболєва [5], талі води Дніпровського зледеніння формували перигляціальну водойму, що відводнивалася у басейн Вісли, а після прориву Мозирських висот стік було змінено до басейну р.

Дніпро, і лише тоді сформувалася долина р. Прип'яті. Про трансгресію озерного басейну дніпровського віку з Дніпрово-Донецької западини на територію Українського щита зазначалось в роботі [1]. За даними дослідження [2] на території Білорусії у межах Поліської низовини існувало Поліське озеро поозерського (валдайського) віку із двома етапами озеротворення — раннім оршанським та пізнім braslavським. Формування двох терасових рівнів долини р. Прип'яті можна пояснити двома етапами виповнення Поліської низовини талими водами поозерського часу і формування відповідних відкладів та геоморфологічних рівнів.

Якщо спиратися на дані про озерні етапи перигляціального розвитку території, то можна припустити, що видлені вище смуги гіпсометричних перегинів (рис. 2) визначають берегові лінії давніх озер етапів їхнього відносно стабільного існування. Саме наявністю водної поверхні та озерного кліфу можна пояснити еrozійні процеси та залишки їхньої діяльності — еrozійно-денудаційні улоговини, які могли сформуватися тільки при наявності базису еrozії. Наявність суфозійних мікрозападин також зумовлено базисом денудації та коливанням рівня дзеркала поверхневих та ґрунтових вод. Наявність незначних еолових пасом у нижній частині гіпсометричних перегинів пояснюється перевіюванням винесених відкладів еrozійними процесами та розвіюванням прибережних відмілин. Необхідно зазначити, що збереженість давніх берегових ліній не є однаковою. Давніші берегові лінії, що займають вище гірометричне положення, мають відносно гірший прояв у рельєфі.

На основі аналізу ЦМД та виділення гіпсометричних «ступенів», дешифрування КЗ вирізняє

лінійні смуги у рельєфі, які інтерпретуються як берегові лінії давніх озерних басейнів (рис. 3).

На рис. 3 представлена схема палеореконструкції розташування передбачуваних різновікових озерних перигляціальних басейнів за даними МДЗЗ. Абсолютні позначки ліній перегинів поверхні визначають рівні дзеркала вод озерних басейнів. Головні принципи використання ЦМР для ландшафтно-геоморфологічних досліджень, визначення послідовності перебігу рельєфоформувальних подій розроблено у роботах [3, 4]. Застосування ЦМР із успіхом може використовуватися як основа для системного аналізу та узагальнення розрізнених геолого-геоморфологічних даних.

Окрім впливу екзогенних чинників, що зумовили формування цих гіпсометричних перегинів, слід зазначити, що ситуаційно субширотні «ступені» пов'язані зі скидом, який відокремлює Прип'ятьську западину від Українського щита та зонами розломів, Північно-Поліським та Південно-Прип'ятьським. Саме структурні особливості на регіональному рівні контролювали межі давніх перигляціальних озерних басейнів. Структурну зумовленість озерних кліфів, а також наслідування плейстоценовими озерними басейнами водойм минулих епох можна використати та враховувати при прогнозуванні та пошуках розсипів або покладів бурштину палеогенових басейнів. При роботах у межах програми створення Держгеолкарти-200 КЗ та ЦМР були

базовою інформацією при укладанні геоморфологічної карти, карти структурного дешифрування та при неотектонічному аналізі.

1. Кошик Ю. А., Тимофеев В. М., Комлев А. А. и др. Новые аспекты истории развития рельефа Южного Полесья в антропогене // Стратиграфия и корреляция морских и континентальных отложений Украины. — Киев: Наук. думка, 1987.—С. 134—143.
2. Мандер Е. П. Антропогенные отложения и развитие рельефа Белоруссии. — Минск: Наука и техника, 1973.—124 с.
3. Пазинич В. Г. Придніпров'я у перигляціалі. Ч. 1. Зміни водності річок // Супутник Київ. географічного щорічника / Під ред. В. М. Пащенко.—2004.—Вип. 2.—156 с.
4. Пазинич В. Г. Науково-пізнавальні можливості цифрових моделей поверхні Землі // Київ. географічний щорічник: Наук. зб.—2005.—Вип. 5.—С. 3—25.
5. Соболев Д. К геологии и геоморфологии Полесья // Вісник Української районової геолого-розвідкової управи.—1931.— Вип. 16.—С. 49—74.

GEOMORPHOLOGIC INVESTIGATION ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA IN THE ELABORATION OF THE STATE GEOMAP-200

N. V. Pazynych

We present the results of the geomorphologic investigation based on the remote sensing data. Digital elevation model was used for system analysis of different initial geological and geomorphologic data. The locations of the Pleistocene postglacial lakes were outlined as the result of the analysis of ancient coastlines representing in the shape.

УДК 528.8.04:550.814.012

А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Методичні засади використання даних ДЗЗ при створенні Державної геологічної карти нового покоління (ГДП-200)

Представлено 25.06.07

Розглядаються головні методичні засади при оцінці геологічної інформативності, цифровій обробці та інтерпретації даних багатозональної космічної зйомки для цілей геологічного картографування та складання Дистанційної основи (ДО) Державної геологічної карти. Пропонуються рекомендації щодо застосування даних ДЗЗ на різних рівнях геологічного вивчення надр.

За останні п'ять-шість років в галузі дистанційних методів вивчення геологічного середовища відбулися суттєві зміни, пов'язані із створенням нового

покоління технічних засобів отримання аерокосмічної інформації, розробкою комп'ютерних систем їхньої обробки та комп'ютерних технологій комп-

лексного аналізу різноманітних геологічних даних, в тому числі інтегрованих географічних геоінформаційних систем (ГІС). Технічні засоби дистанційного зондування нового покоління дозволяють отримувати з космічних та авіаносіїв поруч із даними у видимому діапазоні спектру багатоспектральну і гіперспектральну інформацію малого, середнього та високого просторового розрізнення з цифровою реєстрацією, яка забезпечує різке розширення (у порівнянні з фотографічною) динамічного діапазону енергетичних величин. Використання при аерокосмічному зніманні різних ділянок електромагнітного спектру (видимого, близького інфрачервоного, теплового, мікрохвильового) з фіксацією вимірювань у 4, 7, 14 і більше вузьких діапазонах дозволяє отримувати якісно нову інформацію про геологічні об'єкти земної поверхні, четвертинні відклади, глибину будову, стан та динаміку навколошнього природного середовища [1].

Комп'ютерні засоби обробки ДЗЗ забезпечують широкі можливості виконання геометричних та радіометричних корекцій, а також інтегрованих перетворень даних різних спектральних діапазонів для їхнього представлення у вигляді, найбільш придатному для вирішення завдань інтерпретації. Такі сучасні підходи дають можливість моделювати об'єкти та процеси, що відбуваються в геологічному середовищі.

Незважаючи на це, до цього часу геологи на теренах України використовують дистанційні матеріали недостатньо, методичні підходи до дешифрування застосовують ті, які були переважно напрацьовані в минулі десятиріччя, а інтегрований аналіз аерокосмічної інформації здійснюється із застосуванням лише окремих комп'ютерних технологій початкового рівня. Це призводить до обмеженого використання інформації, яка міститься у сучасних космічних матеріалах і відповідно зменшення ефективності геологозйомочних робіт.

З іншого боку діюча Державна програма геологічного довивчення площ (ГДП-200) та геологозйомочних робіт (ГЗР-50) вимагає складання сучасних цифрових карт геологічного змісту на основі ГІС-технологій. Основою таких побудов є дані ДЗЗ та результати їхньої інтерпретації. Аерокосмогеологічні методи дослідження є важливим засобом, отримання не традиційної інформації про геологічні об'єкти, які вивчаються і картографуються у процесі геологозйомочних робіт. В залежності від поставлених задач та рівня вивченості території геологозйомочний процес поділяється на етапи, які в свою чергу мають свої стадії. На кожній стадії вирішуються певні геологічні задачі та використовуються різні види і методи досліджень.

Мета аерокосмічних методів досліджень при геологозйомочних роботах визначається як вивчення

геологічної реальності на різних зразках земної кори. Задачі, які вирішуються концептуально випливають з поетапними завданнями нормативних документів ГЗР і відносяться, в першу чергу, до геологічного картографування конкретних об'єктів, якими є геологічні тіла та процеси.

Враховуючи, що основним видом геологозйомочних робіт в Україні сьогодні є регіональне геологічне довивчення раніше закартованих площ масштабу 1 : 200000 (ГДП-200) та ГЗР-50 (геологозйомочні роботи із загальними пошуками масштабу 1 : 50000 (1 : 25000), зупинимось детальніше на завданнях АКГД та на рекомендаціях щодо застосування даних ДЗЗ на різних рівнях геологічного вивчення надр. Серед останніх розрізняють оглядово-регіональні та детальні.

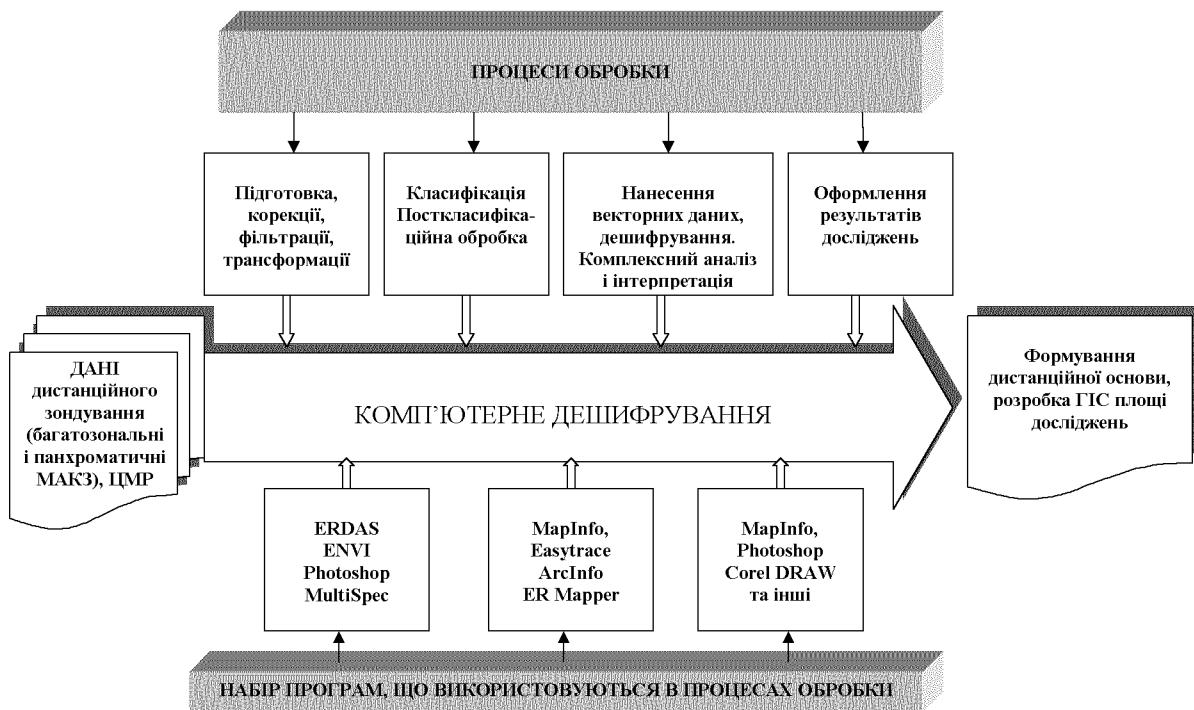
При оглядово-регіональних аерокосмогеологічних дослідженнях (ОРАКГД) вивчаються перш за все основні риси геологічної будови. Уточнюються характеристики відомих систем розривних порушень, виявляються нові системи розломів і аналізується рисунок розривних порушень території в цілому. Коректуються межі надпорядкових тектонічних структур. Особливу увагу надається з'ясуванню просторових закономірностей розподілу крупних тектонічних форм. На єдиній аерокосмічній основі проводиться тектонічне, неотектонічне районування регіону.

Для виконання ОРАКГД використовуються дріномасштабні і середньомасштабні космічні знімки (масштаби 1 : 500 000 і дрібніші).

На основі спільного аналізу аерокосмічної і геологогеофізичної інформації складаються схеми тектонічного, районування, які служать основою для довгострокового планування геологорозвідувальних робіт і вибору ділянок для постановки регіональних аерокосмогеологічних і досліджень [2, 3].

Метою регіональних аерокосмогеологічних досліджень (РАКГД) при ГДП-200 є:

- аналіз, узагальнення та комплексна інтерпретація інформації, одержаної раніше в результаті використання МКЗ при геологічних регіональних дослідженнях території;
- дешифрування МКЗ для уточнення або перегляду уявлень регіональної геологічної будови, в т. ч. і глибинної, з позицій сучасних дистанційних технологій. Виявлення нових лінеаментів, кільцевих структур;
- створення моделі глибинної геологічної будови регіону робіт на основі комплексного аналізу результатів дешифрування і геолого-геофізичних досліджень, яка передбачає нову інформацію про розломно-блокову тектоніку території;
- розробка пропозицій для подальших детальних, пошукових, в деяких випадках пошуково-розведівальних або геоекологічних робіт.



Регіональні аерокосмогеологічні роботи проводяться, як правило, у межах площин однієї трапеції масштабу 1:200 000, або 2-3 площах трапецій, які мають спільні риси геологічної будови і належать до однієї регіональної серії аркушів. При регіональних дослідженнях використовуються дрібно- та середньомасштабні космічні знімки.

Детальні аерокосмогеологічні дослідження (ДАКГД) проводяться з метою:

- створення комплекту фактографічної дистанційної основи, на яких можлива побудова спеціальних карт різного змісту і призначення (тематичного дешифрування; структурного, геоморфологічного (морфоструктурного аналізу), сучасних екзогенних процесів, техногенного навантаження, зміни геологічного середовища та ін.);
- дешифрування МКЗ для детального вивчення геологічної будови району робіт, в т. ч. і глибинної, з позицій сучасних дистанційних технологій. У процесі дешифрування та інтерпретації знімків виділяються додаткові розривні порушення, з'ясовуються закономірності розподілу структурних форм, розміщення корисних копалин;
- створення моделі глибинної геологічної будови регіону робіт на основі комплексного аналізу результатів дешифрування і геолого-геофізичних

досліджень, яка передбачає нову інформацію про розломно-блокову тектоніку території та закономірностей розміщення корисних копалин;

- дешифрування МАКЗ територій для встановлення і вивчення геологічних небезпек (природних і техногенних), моніторингу небезпечних сучасних геологічних процесів;
- картування територій промисловово-міських агломерацій і гірничопромислових районів з метою одержання геологічної основи для екологічного картографування, вирішення геоекологічних і інших питань;
- розв'язання інших загально геологічних завдань, що мають важливе значення для господарства країни та розвитку геологічної науки.

ДАКГД проводяться в гірничопромислових районах, на площах широкого розвитку продуктивних або потенційно високоперспективних геологічних утворень і структур, на площах інтенсивного розвитку або активізації небезпечних природних і техногенних геологічних процесів, на площах, що намічаються для будівництва великих підземних об'єктів спеціального призначення, а також в районах із важливими в науковому або господарському відношенні геологічними об'єктами.

Територіально ДАКГД можуть охоплювати 2-3

аркуші прийнятої в Україні розграфки топографічних карт масштабу 1:50000. При ГЗР-50 в залежності від вирішуваних завдань і вже досягнутої вивченості виділяються такі види: геологічна зйомка (ГЗ-50); геологічне довивчення раніше за картованих площ (ГДП-50); глибинне геологічне картування (ГГК-50); складання та підготовка до видання Геолкарти-50 (25). Детальні аерокосмогеологічні дослідження є невід'ємною складовою частиною технологічного процесу всіх цих видів досліджень. При детальних дослідженнях використовуються середньо та крупномасштабні космічні знімки.

Технологічна модель застосування даних ДЗЗ при геологічному вивчені надр у сучасних умовах наведені на рисунку.

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006.—357 с.

2. Організація та проведення геологічного довивчення раніше закартованіх площ масштабу 1:200000, складання та підготовка до видання Державної геологічної карти України масштабу 1:200000. Інструкція. — К.: Геолком України, 1999.—295 с.

3. Організація та проведення геологозйомочних робіт і складання та підготовка до видання Геологічної карти України масштабу 1:50000 (1:25000). Інструкція. — К.: Департамент геології та використання надр Міністерства екології та природних ресурсів України, 2002.—204 с.

METHODICAL PRINCIPLES FOR THE USE OF DATA OF REMOTE SENSING OF THE EARTH FOR THE DEVELOPMENT OF THE STSTE GEOLOGICAL MAP

A. H. Mychak, V. Ye. Filipovych

We consider the main methodical principles for the estimation of the geological informing, for digital treatment and interpretation of multizonal space survey data for the geological mapping and development of the distance basis for the State geological map. We offer some recommendations for application of remote sensing data at different levels of geological study of the Earth's bowels.

УДК 621.396:621.391.82

О. В. Сытник¹, В. Б. Ефимов²,
В. Н. Цымбал², А. В. Кабанов²

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков

E-mail:... ssvp11@ire.kharkov.ua

²Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков

E-mail:... kalmykov@ire.kharkov.ua

Метод объединения данных многочастотных систем дистанционного зондирования Земли

Представлено 25.06.07

У роботі розглядається метод об'єднання даних двочастотних РЛС зондування поверхні Землі. За основу методу прийнята властивість інваріантності до інверсних радіоконтрастів перетворення Хо. Аналіз радіоображень здійснюється у просторі спектрів параметрів на основі статистично оптимальних алгоритмів. Алгоритм ідентифікації просторово-розділених об'єктів при двочастотному зондуванні полягає у формуванні РЛС кожним локатором, квантуванні цих ображень і отриманні спектрів параметрів всієї сукупності об'єктів, відповідних кожному з бінарних зображень, а потім обчисленні оцінок спектрів параметрів для кожного класу об'єктів, що задовільняють мінімум середнього байесівського ризику. Застосування розглянутого алгоритму для ідентифікації тріщин і ополонок в льодах по зображеннях 3- і 23-сантиметрового локаторів показало можливість ідентифікації шуканих об'єктів з вірогідністю не нижче 0.95 при прямих та інверсних радіолокаційних контрастах понад 10 dB.

Радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА) позволяют получать оперативную ин-

формацию о состоянии подстилающей поверхности в виде радиолокационных снимков местности. Осо-

бенно актуальными являются задачи идентификации ледовых покровов на судоходных трассах, обнаружения и локализации нефтяных и масляных пятен на поверхности моря и т. п. Однако применяемые на практике одночастотные РСА, как правило сантиметрового или дециметрового диапазонов в ряде случаев не позволяют получать оперативные однозначные решения и требуют либо дополнительных измерений, либо длительной статистической обработки принятых сигналов. В силу нестационарности наблюдаемых процессов, например подвижки льдов, быстрого промерзания трещин, переворачивания айсбергов, увлечения нефтяных пятен течениями использование дополнительных или повторных измерений не дает адекватных данных для решения задачи идентификации. В свою очередь, дополнительная детальная обработка информации на земле после проведения измерений снижает ценность получаемых решений в силу устаревания информации.

Оперативное решение задач идентификации представляется возможным при построении многочастотных систем дистанционного зондирования. Поскольку информативными параметрами объектов идентификации, как правило, являются оценки их координат, параметры формы, размеры, мощность рассеянного сигнала и т. п., то алгоритм идентификации должен включать стохастические модели рассеяния сигналов каждого из используемых диапазонов длин волн. Для оперативной обработки данных на борту носителя комплекса РСА возможно использование эмпирических моделей, например описанных в работах [2—5, 7]. Степень соответствия эмпирических моделей реальной действительности выражается в виде априорной неопределенности, как правило, относительно наблюдаемых данных (т. е. признаков распознавания), причем она не может быть устранена предварительным обучением в силу нестационарности наблюдаемого процесса.

Сигнал, рассеянный шероховатой подстилающей поверхностью для РСА дециметрового и сантиметрового диапазонов, описывается выражением [1]:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{m,i}^K(t) = \\ = U_i^K G^K(t - t_i) \exp\left[-j[2\pi V_n^2(t - t_i)^2 / (\lambda^K r_i)] - \psi_i^K\right], \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{s}_{m,i}^K(t)$ — элементарный рассеянный сигнал K -го локатора i -й точечной цели в m -й полосе дальности, U_i^K — максимальное значение отраженного одиночной точечной целью радиосигнала, $G^K(t - t_i)$ — нормирующая функция, характеризующая модуляцию зондирующего и отраженного от цели сигнала при их передаче и приеме диаграммой направленности реальной антенны K -го лока-

тора, r_i — дальность до i -й точечной цели, V_n — скорость полета носителя, λ^K — длина волны зондирующего колебания соответствующего локатора, $t_i = x_i/V_n$, x_i — абсцисса точечной цели, расположенной в m -й полоске дальности, ψ_i^K — изменение фазы радиосигнала K -го локатора при отражении от i -й цели.

Тепловые шумы аппаратуры дополнительно искажают сигнал, и следовательно, их необходимо учесть в алгоритме

$$\xi_{m,i}^K(t) = \dot{s}_{m,i}^K(t) + \dot{n}_{m,i}^K(t), \quad (2)$$

где $\dot{n}_{m,i}^K(t)$ — некоррелированные гауссовские шумы с нулевым матожиданием и дисперсией $(\sigma_{m,i}^K)^2$.

При реализации в блоке обработки сигналов РСА этого алгоритма гармонического анализа радиолокационное изображение местности в m -й полоске дальности будет равно

$$J_m^K(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} \xi_m^K(t) \dot{h}_m^K(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (3)$$

Здесь $\omega = 4\pi V_n \chi / (\lambda r_m)$, χ — абсцисса радиолокационного изображения, T — интервал синтезирования, $\dot{h}_m^K(t)$ — опорная функция для m -й полоски дальности K -го локатора, которая выбирается как взвешенная функция, комплексно сопряженная с сигналом, отраженным от одиночной точечной цели.

При установке на борту носителя двух локаторов различных диапазонов длин волн и при однотипной обработке сигналов в каждом из локаторов формируется два радиолокационных изображения (РЛИ) одного и того же участка поверхности. После предварительной обработки этих изображений, заключающейся в коррекции геометрических искажений, привязки к географическим координатам, процедуры фильтрации и бинарного квантования этих изображений они могут быть использованы в процедуре идентификации.

Будем считать, что каждое из полученных бинарных изображений представляет собой пространство сигналов $L_2(R^n, R)$ размера n . Пространственно расположенные цели на подстилающей поверхности могут быть описаны совокупностью параметров α , которая принадлежит пространству $L_2(R^n, R)$, называемому пространством параметров сигналов размера l . В пространстве сигналов выделим подмножество $M \in R^n$ и введем в рассмотрение характеристическую функцию Θ , с помощью которой будем отмечать принадлежность элемента J_m^K пространства $L_2(R^n, R)$ подмножеству M , т. е.

$$\Theta(J_m^K / M) = \begin{cases} 1, & \text{если } J_m^K \in M, \\ 0, & \text{если } J_m^K \notin M. \end{cases} \quad (4)$$

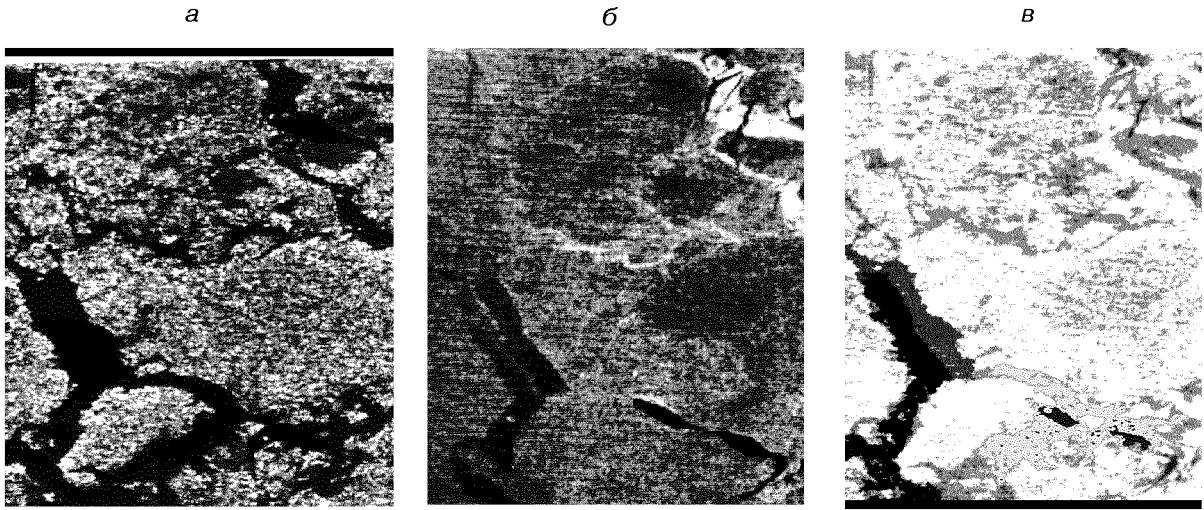


Рис. 1. Радиолокационные изображения участка поверхности моря, покрытого льдами: *a* — диапазон 23 см, *b* — диапазон 3 см, *c* — результат идентификации

Согласно [6, 8] спектр параметров $\alpha \in L_2(R^l, R)$ может быть найден как

$$\begin{aligned} S_\varphi^K(\alpha) &= \int \int_{R^n} \Theta(J_m^K) \delta [\varphi(J_m^K, \alpha)] dJ_m^K = \\ &= \int \int_{R^n} \Theta(J_m^K) \Theta[J_m^K / [\varphi(J_m^K, \alpha) = 0]] dJ_m^K, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varphi(\cdot)$ — функция, устанавливающая зависимость между изображениями заданного класса объекта на подстилающей поверхности и совокупностью его параметров α .

Очевидно, что преобразование (5) необходимо выполнить $2p$ раз, где p — число классов распознаваемых функций $\varphi(J_m^K, \alpha)$. Поскольку всякое бинарное изображение можно рассматривать как характеристическую функцию $\Theta(J_m^K)$ некоторого подмножества M , то каждый спектральный отсчет $S_\varphi^K(\alpha)$ равен объему области, заключенной в пересечении подмножества M с поверхностью $J_m^K(\alpha)$. Очевидно, что максимальный спектральный отсчет $S_\varphi^K(\alpha)$ характеризует то значение вектора параметров α , при котором множество M в максимальной степени похоже на поверхность $J_m^K(\alpha)$. Другими словами, каждый спектральный отсчет $S_\varphi^K(\alpha)$ в точке α дает меру сходства произвольного подмножества M с заданной поверхностью $J_m^K(\alpha)$, имеющей параметр α .

В силу свойства линейности преобразования неаналитические контуры объектов на исходных изображениях можно идентифицировать в виде набора моделей аналитических кривых. Пусть Z — f -то-

чечная модель объекта одного из классов в подмножестве сигнальной области R^n , а $\Theta(J_m^K/Z)$ — его бинарное изображение. Тогда при наличии объекта на изображении хотя бы $f_1 < f$ точек в спектральной области (5) окажутся на поверхности тела, определяемого уравнением $\varphi(J_m^K, \alpha)$, где $\alpha \in M_Z$ — вектор параметров объекта, т. е. $S_\varphi^1(\alpha) \geq f_1$. Аналогичное решение по объекту Z выносится и при обработке изображения от локатора другого диапазона, т. е. $S_\varphi^2(\beta) \geq f_1^2$, где β — вектор параметров объекта, соответствующий изображению 2-го локатора.

Экспериментальное исследование алгоритма показало его эффективность при решении задач идентификации и оценивания координат неоднородностей ледовых и земных покровов. Радиолокационные изображения участка поверхности моря, покрытого льдами, полученные с помощью радиолокаторов дециметрового и сантиметрового диапазонов показано на рис. 1, *a* и рис. 1, *b* соответственно. На рис. 1, *c* показан результат работы алгоритма.

Очевидно, что используя только данные локатора дециметрового диапазона (рис. 1, *a*) или только данные локатора сантиметрового диапазона (рис. 1, *b*), из-за ряда эффектов (таких как рассеяние РЛ-сигнала от шероховатых поверхностей льда, отражение сигнала от боковых стенок трещин льдин, рассеяние сигнала от мокрого снега на поверхности воды и т. п.) однозначная идентификация состояния поверхности выделенных на рис. 1, *c* участков затруднительна.

На рис. 1, *c* представлен результат совместной обработки двухчастотных РЛИ по предложенному

методу анализа радиоконтрастов. Цветом выделены участки, которые отнесены алгоритмом к различным классам поверхностей. Применение рассмотренного алгоритма для идентификации трещин и разводий во льдах по радиолокационным изображениям 3-сантиметрового и 23-сантиметрового локаторов показало возможность идентификации искомых объектов с вероятностью не ниже 0.95 при прямых и инверсных радиолокационных контрастах свыше 10 дБ.

Таким образом, алгоритм идентификации про странственно-распределенных объектов при двухчастотном зондировании состоит в формировании РЛИ каждым локатором, квантовании этих изображений и получении спектров параметров всей совокупности объектов, соответствующих каждому из бинарных изображений, а затем вычислении оценок спектров параметров для каждого класса объектов, удовлетворяющих минимуму среднего байесовского риска.

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. — М.: Радио и связь, 1988.—304 с.
2. Ефимов В. Б., Калмыков А. И., Шестопалов В. П. и др. Исследование ледовых покровов радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей // Изв. АН СССР. Сер. ФАО.—1985.—21, № 5.—С. 512—519.
3. Калмыков А. И., Фукс И. М. Модели рассеяния радиоволн подстилающими поверхностями и их учет в системах радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия.—1996.—1, № 1.—С. 31—41.
4. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. — К.: Наук. думка, 1987.—229 с.
5. Разказовский В. Б. Дифракция на полуплоскости с неровным краем в задаче распространения радиоволн под поверхностью при малых углах скольжения // Изв. вузов.

- Радиофизика.—1997.—40, № 8.—С. 965—979.
6. Сытник О. В., Дубовицкий В. А. Алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при двухчастотном зондировании поверхности земли с помощью РСА // Изв. вузов. Радиоэлектроника.—2000.—43, № 11.—С. 37—46.
 7. Шестопалов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическими методами // ДАН СССР.—1985.—284, № 1.—С. 98—102.
 8. Ballard D. H. Generalizing The Hough Transform To Detect Arbitrary Shapes // Pattern Recognition.—1981.—13, N 2.—P. 111—122.
 9. Ulaby F. T. Microwave Backscatter Dependence on Surface, Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Part1.Bare Soil // IEEE Trans. Geosci. Electron.—1983.—GE-16, N 4.—P. 286—295.

THE MERGE INFORMATION METHOD FOR MULTIFREQUENCY SYSTEMS OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

O. V. Sytnik, V. B. Efimov, V. N. Tsymbal, A. V. Kabanov

The merge information method for two-frequency radar earth surface remote sensing is considered. The method is based on the Hough transform property of radio contrast inverse invariance. The analysis of radio images is carried out in the space of spectrums of parameters on the basis of statistically optimal algorithms. The algorithm of identification of the spatially-distributed objects at two-frequency sounding consists in forming the SAR images by each radar, quantization of these images and obtaining spectrums of parameters for all multitude of objects corresponding to each of the binary images, and then in calculating estimations of spectrums of parameters for every type of objects satisfying the minimum of the middle Bayes risk. The application of the algorithm under consideration for identification of cracks in ices on the radar images of two-frequency radar remote sensing showed the possibility to identify the sought-for objects with a probability not below 0.95 at direct and inversed radar contrasts over 10 dB.

УДК 621.396:621.391.82

В. Б. Ефимов¹, А. С. Курекин¹, О. В. Сытник²,
В. Н. Цымбал¹, А. С. Гавриленко¹, А. В. Кабанов¹

¹Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков
kalmykov@ire.kharkov.ua

²Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков
ssvp11@ire.kharkov.ua

Обзорная радиолокационная система дистанционного зондирования Земли с повышенным азимутальным разрешением

Представлено 25.06.07

Пропонується система для дистанційного зондування Землі на основі імпульсного когерентного радіолокатора, що працює в двох режимах — оглядовому і високої роздільній здатності. У оглядовому режимі радіолокатор має азимутну роздільну здатність 50—100 м і смугу огляду 500—600 км при висоті орбіти носія 650—750 км. У режимі високої роздільній здатності локатор працює за принципом радіолокатора з синтезом апертури антени (PCA) і має близьку до потенційної роздільній здатності, що приблизно дорівнює 2—5 м в смузі 10—15 км в будь-якій частині загальної смуги огляду 500—600 км. PCA випромінює послідовністі пачок радіоімпульсів з носійною частотою, яка змінюється від імпульсу до імпульсу. При цьому частота повторення імпульсів в пачці вибрана високою для однозначного опису доплерівського зсуву частоти, а частота випромінювання пачок вибрана настільки низькою, щоб виключити неоднозначність за дальністю. Частотна селекція імпульсів в межах однієї пачки здійснюється в широкосмуговому тракті проміжної частоти із загальною шириною смуги близько 100 МГц. Блок обробки сигналів будеться за багатоканальною схемою. Кількість каналів блоку обробки визначається числом частотних зсувів усередині пачки імпульсів. Частотно-часова селекція відбитих від поверхні Землі сигналів і стиснення імпульсів для забезпечення високої роздільній здатності за дальністю здійснюється в кожному каналі окремо. У роботі розглядаються особливості побудови багатоканальної структури приймального пристрою PCA і алгоритм обробки траекторного сигналу. Обговорюються обмеження на кількість додаткових вузькосмугових трактів і ширину частотної смуги кожного каналу.

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам, связанным с экологическим и кризисным глобальным мониторингом Земли космическими системами дистанционного зондирования. К этим проблемам относятся наблюдения природных ледовых систем Арктики и Антарктики, обнаружение и оценка параметров активных метеообразований над морской поверхностью, в том числе тропических ураганов, тайфунов и т. д. Все это требует использования адекватных средств дистанционного зондирования космического базирования, обеспечивающих оперативную съемку поверхности Земли в полосе обзора 400—500 км и более. Известен опыт многолетней эксплуатации космических радиолокаторов бокового обзора ИСЗ «Космос-1500»/«Океан»/«Сич-1» [2, 3]. В настоящее время успешно функционируют радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (PCA) спутников RADARSAT, ENVISAT [www.rsi.ca/products/sensor/radarsat/

radarsat1.asp и www.esa.int/envisat], которые обеспечивают в режиме «Scan SAR» наблюдения в полосе обзора порядка 400 км. Реализация такого режима предполагает использование крупногабаритной и дорогостоящей фазированной антенной решетки.

В работе предлагается PCA для малых космических аппаратов (весом до 1000 кг). Радиолокатор для дистанционного зондирования Земли обеспечивает возможность проведения съемки поверхности Земли в одном из двух режимов:

- обзорный режим — в полосе обзора 500—600 км с разрешением 50—100 м;
- детальный режим в полосе захвата 500—600 км при полосе обзора 10—15 км с разрешением 2—5 м.

При выборе технических характеристик PCA, в частности полосы обзора и потенциально достижимого разрешения, существует ряд ограничений,

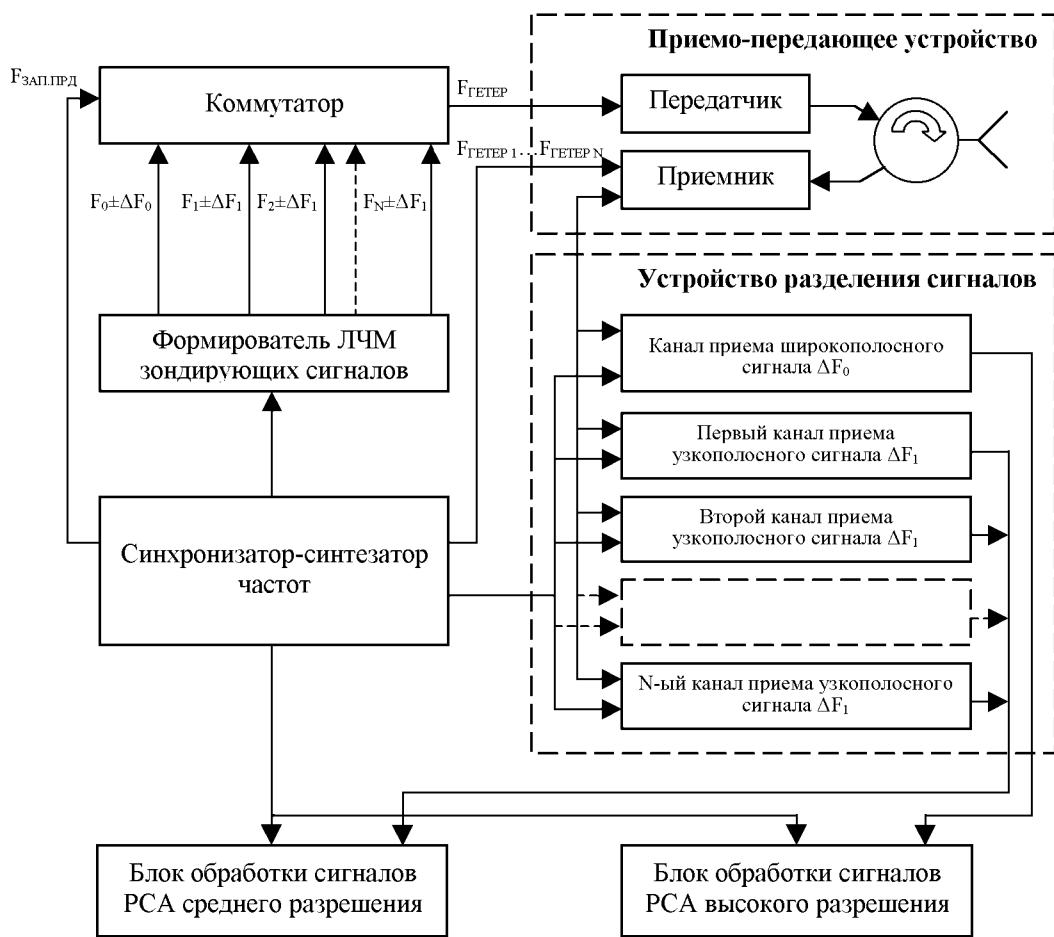


Рис. 1. Укрупненная структурная схема двухрежимного РСА

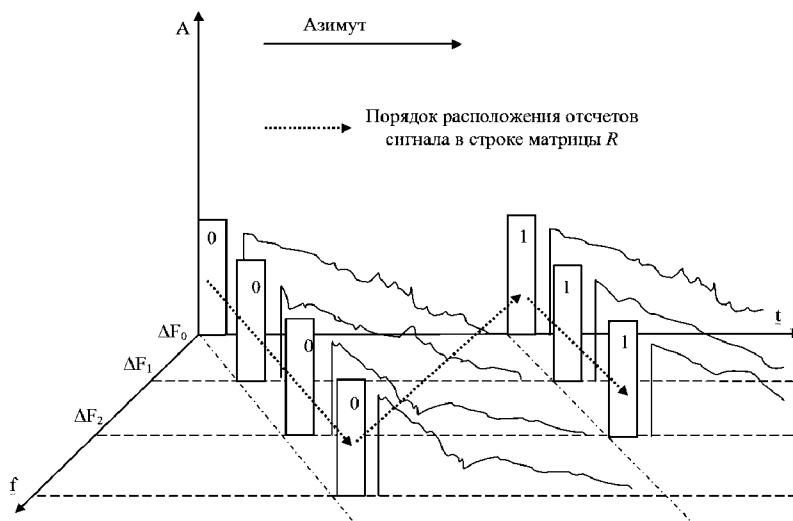


Рис. 2. Порядок расположения отсчетов сигналов в плоскости задержка — частота

связанных с особенностями построения этих систем. Так, максимальная полоса обзора РСА ограничена выбором минимально возможной частоты повторений ($f_{p\min}$) зондирующих сигналов. Величина минимальной частоты повторений определяется из требований к описанию доплеровского спектра траекторного сигнала как

$$f_{p\min} \geq 2v/d, \quad (1)$$

где v — скорость движения носителя РСА, d — размер апертуры антенны в азимутальной плоскости. В то же время потенциальное разрешение РСА в азимутальной плоскости составляет $L_a = d/2$. В свою очередь, для однозначного разделения сигналов по дальности (в угломестной плоскости) частота повторений ($f_{p\max}$) зондирующих сигналов должна удовлетворять соотношению

$$f_{p\max} \leq 1/[2\tau_u + 2\Delta R/c], \quad (2)$$

где ΔR — полоса обзора, τ_u — длительность зондирующего импульса, c — скорость света.

Для однозначного описания траекторного сигнала по дальности предлагается формировать пачку из n радиоимпульсов с разными (но достаточно близкими) несущими частотами. При этом частота повторения импульсов в пачке определяется соотношением (1), а частота следования пачек — соотношением (2). Для однозначного разделения сигналов в угломестной плоскости проводится фильтрация траекторного сигнала в частотной области и пространственная селекция по дальности. Процедура синтезирования в азимутальной плоскости проводится с учетом изменения несущей частоты зондирующих импульсов в пределах последовательности. Укрупненная структурная схема двухрежимного РСА показана на рис. 1.

При реализации двухрежимной системы целесообразно использовать общие широкополосные (порядка 100 МГц) узлы приемо-передатчика, а переключения режимов фактически сводятся к изменению режимов в формирователе зондирующих радиосигналов и режимов работы антенны. Характерная полоса канала для обзорного режима 1—2 МГц, количество каналов 5—10 при полосе обзора порядка 500—600 км.

Синтезирование антенны в азимутальной плоскости в блоке обработки сигналов РСА высокого разрешения осуществляется методом свертки опорной функции и траекторного сигнала по известному алгоритму [1]. Полоса захвата 500—600 км обеспечивается перенацеливанием антенной системы.

В блоке обработки сигналов РСА среднего разрешения отсчеты сигналов каждого узкополосного частотного канала предварительно сжимают по дальности при помощи линий задержки, оцифровывают и записывают в ячейки памяти на сдвиговых

registрах, откуда они поступают через коммутатор в блок памяти, где формируется матрица отсчетов сигналов взятых с выходов каждого частотного канала для последующего синтезирования и формирования радиолокационного изображения подстилающей поверхности. Порядок расположения отсчетов сигналов в плоскости задержка-частота при формировании матрицы сигналов показан на рис. 2. Результирующая матрица R , элементы которой есть отсчеты траекторного сигнала, взятые в соответствии с теоремой Котельникова из каждого узкополосного канала и расположенные вдоль азимутальных строк следующим образом:

$$R^0 = \begin{pmatrix} r_{1,1}^0 & r_{1,2}^0 & \dots & r_{1,m}^0 \\ r_{2,1}^0 & r_{2,2}^0 & \dots & r_{2,m}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p,1}^0 & r_{p,2}^0 & \dots & r_{p,m}^0 \end{pmatrix}, \dots,$$

$$R^n = \begin{pmatrix} r_{1,1}^n & r_{1,2}^n & \dots & r_{1,m}^n \\ r_{2,1}^n & r_{2,2}^n & \dots & r_{2,m}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p,1}^n & r_{p,2}^n & \dots & r_{p,m}^n \end{pmatrix}.$$

Здесь верхний индекс — номер отсчета в выбранном узкополосном канале по дальности, нижний двойной индекс — номер импульса в выбранном узкополосном канале и номер узкополосного частотного канала.

Таким образом, матрица R имеет размер $m \cdot p \cdot n$, где m — число отсчетов сигнала по дальности; p — число импульсов одного частотного канала, которые используются для синтезирования текущей азимутальной строки (или число импульсов, укладывающихся на интервале синтезирования $L_{\text{сint}}$); n — число частотных каналов блока обработки.

Синтезирование апертуры антенны в k -й строке дальности теперь может выполняться путем свертки k -й строки матрицы R с соответствующей опорной функцией, то есть

$$S_i^k = R^k \otimes H^k = \sum_{j=0}^{(n-1)p} R_{k,j+i} h_{k,j},$$

$$i = 0, 1, \dots, (n-1)p,$$

где $h_{k,j}$ — элементы весовой функции, k — номер строки по дальности.

Таким образом, благодаря многоканальной структуре приемного устройства с частотной окраской каждого излученного импульса оказывается возможным одновременное выполнение условий (1) и (2) для заданных ΔR и V/d . Ограничения на количество дополнительных узкополосных каналов и ширина частотной полосы каждого канала определяются требуемым разрешением и заданной шириной полосы 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. Калмыков А. И., Синицын Ю. А., Сытник О. В., Цымбал В. Н. Информативность радиолокационных систем зондирования Земли из космоса // Изв. вузов. Радиофизика.—1989.—32, № 9.—С. 1055—1062.
3. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990.—200 с.

SURVEYING RADAR SYSTEM FOR THE REMOTE SENSING OF THE EARTH WITH ENHANCED AZIMUTHAL RESOLUTION

V. B. Efimov, A. S. Kurekin, O. V. Sytnik,
V. N. Tsymbal, A. S. Gavrilenko, A. V. Kabanov

The system is offered for the remote sensing of the Earth on the basis of the pulse coherent radar operating in two modes, surveying and

of high resolution. In the surveying mode the radar has an azimuthal resolution 50—100 m and swath about 500—600 km at a height of orbit from 650 to 750 km. In the mode of high resolution the radar works on the SAR principle and has a potential resolution 2—5 m in swath 10—15 km in any part of general swath of 500 to 600 km. SAR radiates the sequence of packs of pulses with bearing frequency changing from one impulse to the other. Thus, pulse repetition frequency in a pack is chosen to describe the displacement of trajectory signal Doppler frequency, but the frequency of packs is chosen low enough to exclude an ambiguity on distance. The frequency selection of impulses within the limits of one pack is carried out in the wideband of intermediate frequency with the general width of band about 100 MHz. The signal processing block is built on a multichannel scheme. The amount of channels of the block is determined by the number of frequency changes into the pack of impulses. The frequency-temporal selection of the signals reflected from the surface and compression of impulses for providing high range resolution are carried out in every channel separately. The features of construction of multichannel structure of SAR receiving device and algorithm of the trajectory signal processing are examined. The limitations on the amount of additional narrowband channels and width of frequency band of every channel is the subject of wide discussion.

УДК 621.396:621.391.82

О. В. Сытник¹, В. Б. Ефимов²,
В. Н. Цымбал², А. В. Кабанов²

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков
ssvp11@ire.kharkov.ua

²Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков
kalmykov@ire.kharkov.ua

Динамическая адаптивная коррекция радиолокационных изображений

Представлено 25.06.07

Розглядаються задачі побудови адаптивних алгоритмів синтезу радіолокаційних зображень поверхневих шарів місцевості по сигналам когерентного бортового радіолокатора. Запропонований алгоритм належить до класу адаптивних алгоритмів, які вилучають інформацію про траекторні похибки безпосередньо з відбитого від поверхневого шару землі радіолокаційного сигналу. Як інформаційні параметри використовується математичне очікування оцінки зсуву доплеровського спектру на інтервалі синтезування, а також її вищі похідні. Це забезпечує можливість автоматичного корегування зображень, що обумовлені не тільки похибками по швидкості польоту носія, а також дозволяють урахувати похибки прискорення та швидкості прискорення при формуванні радіолокаційних зображень. У роботі наведені результати обробки сигналів бортового РСА. Обговорюються особливості роботи алгоритму у різних умовах.

Отклонения от заданной траектории полета носителя радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (PCA) [3, 5], которые не учтены в алгоритме обработки сигнала в виде соответствующих кор-

ректирующих функций, приводят к искажениям результирующего радиолокационного изображения. В частности это расфокусировка, смещение объектов относительно их истинного положения, потеря

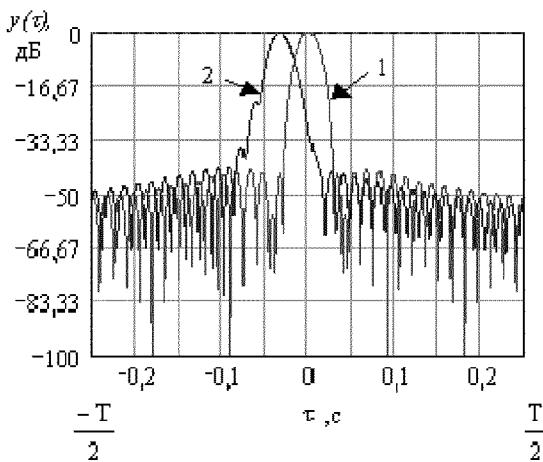


Рис. 1. Искажения синтезированной диаграммы направленности антенны РСА

яркости изображения, увеличение боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности (ДН) и ряд других искажений [1, 4, 6, 7].

Создание радиолокационной аппаратуры, инвариантной к типу и характеристикам бортовых навигационных средств, и одновременно обеспечивающей автоматическую коррекцию радиолокационных изображений, возможно благодаря извлечению информации о траекторных ошибках непосредственно из отраженного сигнала.

В общем виде алгоритм формирования синтезированной апертуры в азимутальном направлении для фиксированной дальности можно представить в виде интеграла свертки [3]:

$$y(\tau) = \text{mod} \left\{ \int_{-\frac{T_c}{2}}^{\frac{T_c}{2}} \dot{x}(t - \tau) \dot{h}(t) dt \right\}, \quad (1)$$

где $\text{mod}\{\cdot\}$ — операция вычисления модуля, T_c — интервал времени, в течение которого выполняется синтезирование апертуры антенны, $\dot{x}(t - \tau) = \dot{s}(t - \tau) + \dot{n}(t)$ — аддитивная смесь отраженного от подстилающей поверхности сигнала $\dot{s}(t - \tau) = A(t - \tau) e^{-j[4\pi r_i(t)/\lambda]}$, A — амплитуда отраженного сигнала, $r_i(t)$ — текущее значение наклонной дальности от фазового центра передающей антенны до i -го точечного отражателя, λ — длина волны зондирующих колебаний (без потери общности множитель $\omega_0 t$ в этом выражении опущен) и некогерентного гауссовского шума $\dot{n}(t)$ с дисперсией σ^2 и нулевым математическим ожиданием; $\dot{h}(t) = H(t) e^{j[2\pi v t / (\lambda r_0)]}$ — опорная функция, где $H(t)$ — весовая функция (в простейшем случае $H(t) \equiv 1$), v — путевая скорость движения носителя РСА.

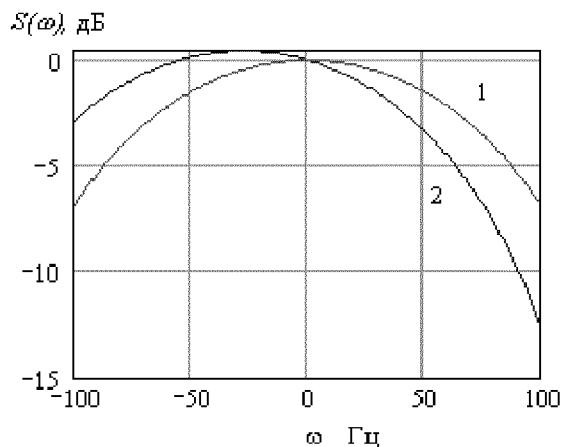


Рис. 2. Идеализированная форма диаграммы направленности антенны РСА огибающей спектра доплеровских частот

В результате работы алгоритма (1) при отсутствии траекторных ошибок формируется ДН эквивалентной антенны, показанная на рис. 1 (кривая 1). Кривая 2 иллюстрирует характер искажений, возникающих при нестационарном движении летательного аппарата. Характер изменения траекторного сигнала на интервале синтезирования T_c при облучении бортовым локатором точечной цели подчиняется закону линейного частотно-модулированного колебания с круговой частотой $\omega = 4\pi v(t)/(\lambda r_0)$. При $v(t) = \text{const}$ закон изменения частоты сигнала в пределах главного лепестка реальной ДН есть линейная функция, а огибающая его спектра — симметрична относительно центрального элемента массива отсчетов траекторного сигнала и монотонно убывает с увеличением частоты (как показано на рис. 2, кривая 1). Ошибки в определении параметров движения носителя РСА приводят к искажениям формы спектральной плотности, в частности к ее асимметрии относительно середины распределения (кривая 2, рис. 2). Поэтому кажется перспективным использование отличия формы реального спектра сигнала от идеального путем введения соответствующих корректирующих составляющих в опорную функцию алгоритма синтезирования (1).

Амплитудный спектр доплеровских частот реального сигнала, отраженного от различных по масштабу и радиофизическим свойствам элементов подстилающей поверхности, носит флукуционный характер, и его непосредственное использование для построения корректирующей опорной функции затруднительно. На рис. 3 показан усредненный по 128 соседним стробам наклонной дальности спектр траекторного сигнала на участке траекто-

рии, где летательный аппарат совершил маневр.

Из-за значительной дисперсии отсчетов огибающей спектра построить формализованную процедуру вычисления достоверных оценок величин смещения и коэффициентов асимметрии для получения корректирующих составляющих опорной функции затруднительно. Однако, если полученные из реальной последовательности спектральные отсчеты аппроксимировать известной функцией, например полиномом, то процедура вычисления корректирующих коэффициентов опорной функции легко

формализуется. Здесь крестиками показаны спектральные отсчеты траекторного сигнала, а сплошной линией — его полиномиальная аппроксимация полиномом третьей степени с коэффициентами 24.469, 0.024, $1.656 \cdot 10^{-5}$, $-4.507 \cdot 10^{-8}$.

Среднее квадратичное значение ошибки σ_p аппроксимации не превышало 0.248. Фазовые ошибки, связанные с неадекватным представлением закона изменения путевой скорости, можно представить в упрощенном виде:

$$\varphi_v(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left[\Delta v t + \frac{1}{2} a t^2 + \frac{1}{6} a' t^3 \right], \quad (2)$$

где Δv , a , a' — ошибки измерения путевой скорости, ускорения и производной от ускорения соответственно.

Корректирующие фазу опорной функции (1) коэффициенты Δv , a , a' найдем из сравнения кривых 1 и 2 рис. 2. В качестве кривой 2 необходимо использовать модель аппроксимирующей функции, показанной на рис. 3. Ошибку Δv определения путевой скорости вычислим путем отыскания смещения экстремума кривой 2 по отношению к эталонной кривой 1. Формализовать эту процедуру можно при помощи метода сопряженных градиентов [2]. Обозначим смещенную спектральную плотность как $S_2(\omega)$. Тогда значение аргумента $\omega = \omega^*$, соответствующее экстремуму ω^* , находится путем итерирования:

$$\omega^{k+1} = \omega^k - \alpha_k \nabla S_2(\omega^k) + \beta_k (\omega^k - \omega^{k-1}), \quad (3)$$

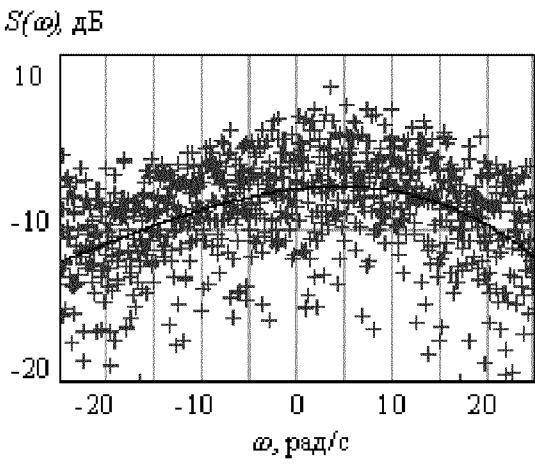


Рис. 3. Спектр траекторного сигнала

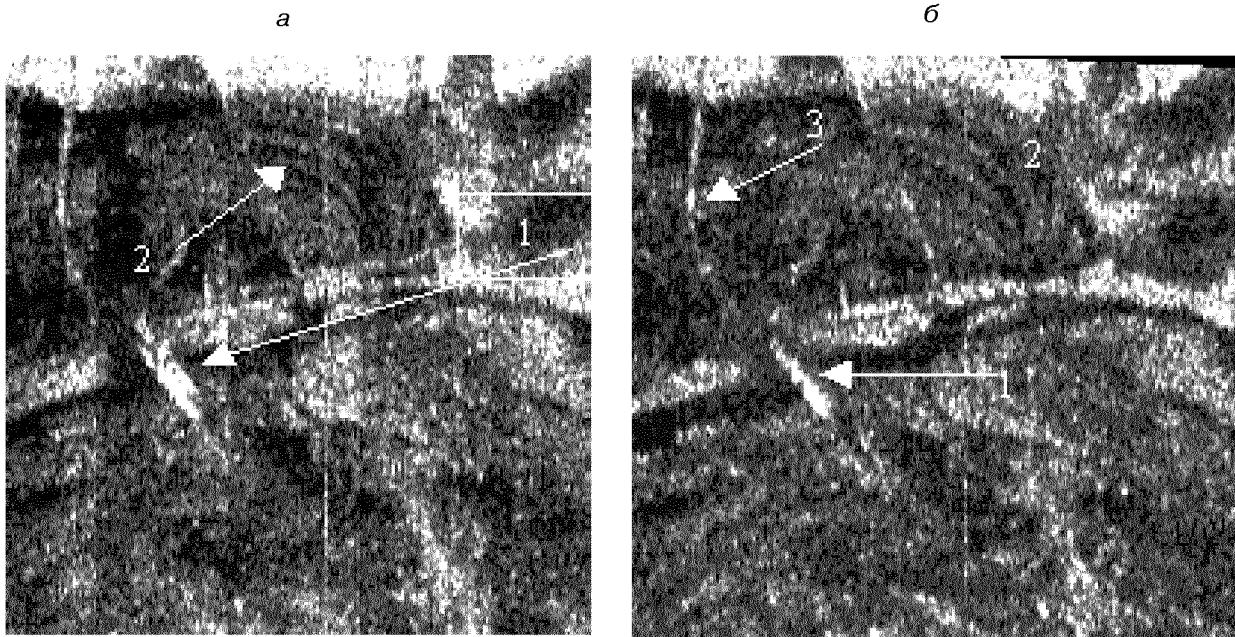


Рис. 4. Радиоизображение местности: *а* — при маневре летательного аппарата, *б* — при адаптивной компенсации траекторных ошибок

где оптимальные значения коэффициентов α_k , β_k на каждом шаге вычисляются из условия

$$\{\alpha_k, \beta_k\} = \underset{[\alpha_k, \beta_k]}{\operatorname{argmin}} [S[\omega^k - \alpha_k \nabla S_2(\omega^k) + \beta_k(\omega^k - \omega^{k-1})]].$$

Для упрощения вычислительной процедуры коэффициенты α_k , β_k можно выбирать в пределах $0 < \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta < 1$. Тогда метод сопряженных градиентов (3) сводится к методу тяжелого шарика [2].

Эффект от применения адаптивной коррекции изображения, которое получено при синтезировании из голограммы самолетного радиолокатора дециметрового диапазона ($\lambda = 0.23$ м), виден при сравнении рис. 4, а и б. Здесь азимутальное направление показано сверху вниз, а направление по наклонной дальности — слева направо. Разрешение по наклонной дальности составляло 22.5 м, а по азимуту — примерно 10 м. В частности, в результате применения адаптивной коррекции радиоизображения повтор объекта 1 на рисунках отсутствует. Периодическая структура, отмеченная цифрой 2 на обоих рисунках, осталась практически без изменения. При вычислении корректирующих коэффициентов использовалась спектральная оценка, показанная на рис. 3. Кроме визуальной оценки синтезированных изображений подстилающей поверхности, в качестве оперативного критерия можно использовать сравнительный анализ радиолокационных контрастов вдоль строки записи сигнала на протяжении всего сеанса работы.

Таким образом, исходная когерентная запись траекторного сигнала подвергается предварительно му фурье-анализу, и одновременно отсчеты траекторного сигнала сохраняются в элементах памяти. Затем с целью снижения дисперсии флуктуационной составляющей сигнала выполняется усреднение по нескольким соседним строкам дальности. Полученную таким образом спектральную оценку подвергают полиномиальной аппроксимации, и результатирующий полином исследуют на экстремум при помощи рекуррентной двухшаговой процедуры. В зависимости от степени полинома, заранее заложенной в модель, алгоритм способен вычислять корректирующие коэффициенты Δv , a , a' опорной

функции. Выбор двухшаговой рекуррентной процедуры обусловлен необходимостью компромисса между скоростью сходимости и объемом вычислений, приходящихся на одну итерацию.

1. Ицхоки Я. С., Сазонов Н. А., Толстов Е. Ф. Основные характеристики РСА при произвольном движении летательного аппарата // Радиотехника и электроника.—1984.—29, № 11.—С. 2164—2172.
2. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию. — М.: Наука, 1983.—384 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горянова. — М.: Радио и связь, 1988.—304 с.
4. Сытник О. В., Кабанов А. В., Ефимов В. Б. и др. Критерий качества радиолокационного изображения когерентных систем дистанционного зондирования // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 287—288.
5. Томису К. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры и их применение для отображения поверхности океана // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике.—1978.—66, № 5.—С. 40—67.
6. Ноулам D. Motion errors and compensation possibilities // AGARD Lecture Series 182. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR).—1992.—P. 31—42.
7. Moreira J. A. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time SAR motion compensation // Proc., IGARSS Symposium, Vancouver, Canada. — 1999.—P. 1—7.

DYNAMIC ADAPTIVE CORRECTION OF RADAR-TRACKING IMAGES

O. V. Sytnik, V. B. Efimov, V. N. Tsybala, A. V. Kabanov

We consider the problems of construction of adaptive algorithms for synthesizing radar-tracking images of spreading surface on the basis of signals of a coherent onboard radar. The offered algorithm belongs to the type of self-adapting algorithms in which the information on trajectory mistakes is taken directly from the reflected signal. As the information parameters, we use the estimation of displacement of a Doppler spectrum on the interval of synthesizing which is averaged on inclined range together with its supreme derivatives. This provides the possibility of automatic correction of the images caused not only by mistakes in speed of flight of the carrier, mistakes in the acceleration and speed of acceleration change. The results of synthetic aperture radar signals are given. Some features of the algorithm operation in various conditions are discussed.

Г. В. Нестеренко, Д. А. Шелковенков, Е. А. Иванова, Е. Ю. Бондарь

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, кафедра ОРТ; тел.+38 (057) 700-22-84
E-mail: secort@kture.kharkov.ua

О возможности обеспечения автономной высокоточной синхронизации шкал времени (частоты) разнесенных хранителей по сигналам внешних источников

Представлено 25.06.07

При реализации процедуры обеспечения работы телекоммуникационных сетей необходима высокоточная синхронизация хранителей [3]. Задачи синхронизации шкал частоты и шкал времени различаются между собой и по сложности, и по методам, причем синхронизация (сличение) шкал времени, как правило, сложнее в реализации, чем синхронизация шкал частоты. Зачастую для ряда технических приложений решение задачи синхронизации шкал частоты оказывается достаточным.

Современный парк технических средств хранения и сличения/синхронизации весьма обширен. Используются различные хранители, каналы, сигналы, аппаратура, принципы, методы [1]. Запросы и требования потребителей также разнообразны, и иногда — весьма специфичны. Например, существует постановка задачи: создание сети синхронизированных хранителей в условиях полной автономности, т. е. независимости от использования в «своих» каналах «чужих» технических средств, способных проявить сбой или выключение (в особенности — преднамеренные). Известны случаи смещения навигационного поля и спутниковых шкал времени в критических ситуациях. Автономизация не всегда обеспечивается по совокупному критерию реализуемости и применимости метода. Из числа каналов и средств высокоточного сличения автономными являются радиометеорный канал (РМК) и комплекс перевозимых квантовых часов (ПКЧ). Недостаток РМК — необходимость излучения в эфир. Недостаток ПКЧ — высокая стоимость и очень низкая оперативность. Использование сигнала космических источников (пульсаров) требует использования дорогостоящей аппаратуры и длительных интервалов измерения.

Рассмотрим вариант построения автономной системы синхронизации шкал частоты, использующей сигналы вещания со спутников, расположенных на

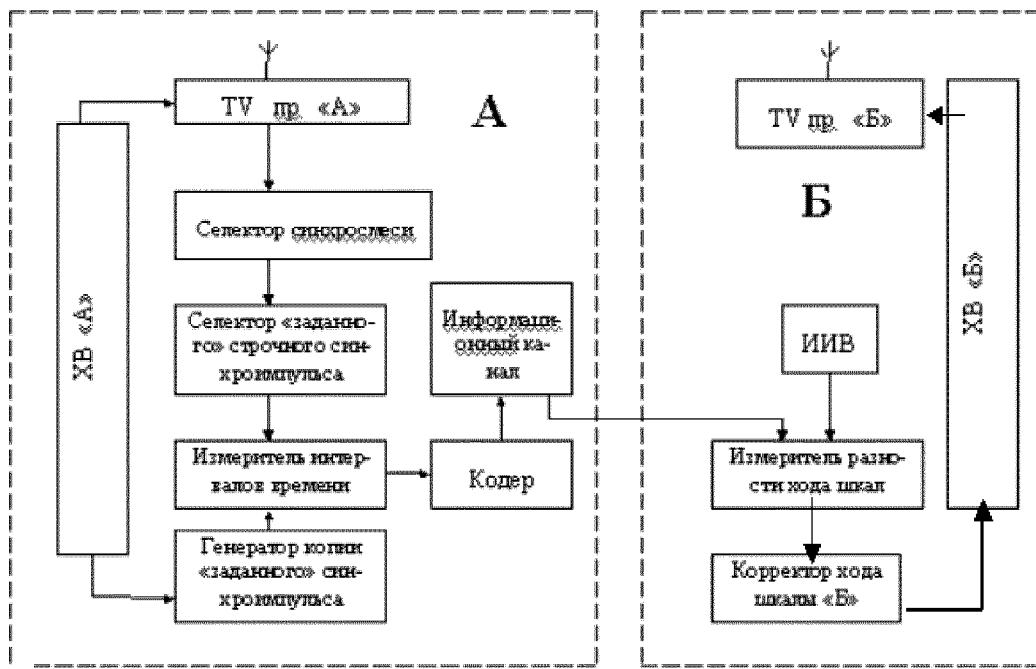
геостационарных орбитах.

Автономность такой системы, несмотря на кажущуюся зависимость от параметров состояния используемых спутниковых ретрансляторов, состоит в том, что эти спутники не являются стратегическими объектами; их количество — велико; большая часть вещательных каналов открыты для всеобщего пользования. Поэтому живучесть и надежность такой автономной системы синхронизации, использующей их сигналы, высоки. В ней используется метод «одного общего внешнего события». Потенциальная погрешность этого метода определяется разностью хода сличаемых хранителей частоты/времени на интервале разности задержек распространения между пунктами А, Б независимо от значения относительной нестабильности хранителей на борту спутника.

Предположим, что в некоторый момент времени на спутнике происходит событие $\delta(t_0)$ — излучается локализованный на известном интервале времени фрагмент сигнала (например, синхросмесь кадра). Этот сигнал формируется на борту спутника и его характеристики стабильности определяются стабильностью бортового хранителя. Обычно для ТВ вещания она имеет порядок 10^{-6} . Время распространения сигнала от спутника в пункты А, Б неизвестно. Расстояние между пунктами хранения шкал А, Б — также неизвестно.

Задача: используя только сигналы спутникового телевидения, произвести синхронизацию шкал частоты хранителей в пунктах.

Событие $\delta(t_0)$ воспринимается в пункте А с задержкой $T_A = D_A/c$, где D_A — наклонная дальность до спутника в пункте А, c — скорость света. Событие $\delta(t_0)$ в пункте Б будет зафиксировано на $\Delta T = (D_B - D_A)/c$ позже. Разность задержек моментов фиксации события в пунктах максимальна для



Вариант системы синхронизации шкал частоты

случая, когда пункт А «видит» спутник в зените, а пункт Б — на горизонте. Для геостационарного спутника (ГСС) она не превосходит величины R_3/c , где R_3 — радиус Земли, т. е. $20 \cdot 10^{-3}$ с. Если считать, что часы в пунктах имеют порядок нестабильности 10^{-9} , а их взаимный ход — максимальен, то при корректном измерении параметра задержки события $\delta(t_0)$ в пунктах при высоких соотношениях «сигнал/шум» оценка сверху погрешности такого метода имеет порядок 10^{-12} .

Предлагается такой вариант системы синхронизации шкал частоты по предлагаемому методу (рисунок). В пунктах синхронизации устанавливается аппаратура для приема телевизионных сигналов одной и той же программы одного и того же спутника, выделяется заранее оговоренное событие и измеряется интервал времени между ним и собственной шкалой времени. Измеренное значение периодически передается из ведущего (пункт А) в ведомые пункты по какому-либо информационному каналу. В них проводятся измерения задержек между моментами приема оговоренных событий и характерными точками собственных шкал времени. Располагая информацией о значении этой задержки в ведущем пункте, легко произвести коррекцию хода собственной шкалы по критерию минимума разности хода ведомой и ведущей шкал.

При наличии в спектре телевизионных сигналов остатка несущей возможна реализация предложен-

ного метода путем компарирования частот принятого со спутника и сформированного из собственной шкалы сигналов с последующей передачей информации о разности их значений в ведомые пункты для последующей коррекции хода их шкал.

Односторонняя трансляция измерительной информации из ведущего в ведомые пункты обеспечивает возможность синхронизации по частоте, а взаимный обмен информацией о моментах фиксации событий в пунктах позволяет производить сличения шкал времени.

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Б. Л. Кащеева, М. Ф. Лагутина, Е. Г. Прошкина. — Харьков: Бизнес информ, 2002.— С. 219—305.
2. Коваль Ю. А., Антипов И. Е., Бавыкина В. В. и др. Прием телевизионных сигналов времени и частоты по метеорному радиоканалу // Радиотехника.—2001.—Вып. 117.—С. 42—45.
3. Коваль Ю. А., Антипов И. Е., Крючкова Л. П. и др. Радиометеорный метод синхронизации в сетях электросвязи // Сб. науч. тр. НГА Украины.—2001.—2, № 11.— С. 53—57.

ON THE POSSIBILITY OF PROVISION OF AUTONOMOUS HIGH-ACCURACY SYNCHRONIZATION OF TIME SCALES (FREQUENCY) OF SPACE-APART KEEPERs ON THE BASIS OF EXTERNAL SOURCE SIGNALS

*G. V. Nesterenko, D. A. Shelkovenkov, E. A. Ivanova,
E. Yu. Bondar*

УДК 0044; 004.78

Е. Б. Кудашев¹, А. Н. Филонов²

¹Институт космических исследований РАН

²Институт проблем информатики РАН

Распределенный доступ и поиск данных дистанционного зондирования Земли из космоса

Представлено 25.06.07

Рассматриваются актуальные задачи формирования электронной среды взаимодействия для объединения электронных архивов и оп-line каталогов спутниковых данных. Выполнен анализ формирования национальной инфраструктуры пространственных данных в США и в Европейском Сообществе. Показано, что общими целями программ SDI и INSPIRE является обеспечение координированного распределенного доступа к спутниковым информационным ресурсам.

1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В мировой науке и в практических применениях космические исследования занимают одно из важных мест. Пятьдесят лет назад началась космическая эра исследования и использования космического пространства, после того как в 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый искусственный спутник Земли.

Началом дистанционного зондирования Земли с помощью спутников принято считать 1 апреля 1960 г. В этот день в США был запущен спутник «Tiros-1», в задачи которого входило исследование атмосферных явлений. В СССР метеорологический спутник «Космос-122» поднялся на орбиту 25 июня 1966 г. В 1970-х гг. на орбите Земли появились уже десятки различных автоматических спутников. Они выполняют самые разные задачи: следят за возникновением лесных пожаров, разливом рек и наводнениями, фиксируют различные природные и техногенные катастрофы и т. п.

В наши дни орбита Земли «патрулируется» множеством спутников дистанционного зондирования (ДЗЗ) различной специализации. Они оборудованы специальными сенсорными системами, которые способны улавливать отраженный от поверхности Земли свет и другие виды излучений. Обычно эти сенсоры автоматически включаются с интервалом в 5 минут. Каждый из них фиксирует излучение с определенной длиной волны. На борту спутника данные, поступившие с сенсоров, сводятся воедино,

оцифровываются и отсылаются на наземные приемные станции. В настоящее время ежедневно принимаются, обрабатываются, поставляются и архивируются огромные потоки спутниковых данных — цифровые спутниковые фотографии поверхности Земли. Исследователю доступны данные со спутников «Radarsat» (Канада), французских спутников SPOT 2 и SPOT 4; «Landsat-4, -5, -7» и серии EOS — «Terra» и «Aqua» (США); индийских космических аппаратов IRS-1C/1D и спутников «Ресурс-01» и Метеор-ЗМ» (Россия); с метеорологических спутников NOAA (США) и со спутников высокого разрешения EROS (Израиль) и первого немецкого спутника «Terra SAR-X»; с геостационарных спутников: японского GMS-5 и китайского FY-2B. Спутниковые данные широко используются для решения различных задач, связанных с организацией контроля состояния окружающей среды и безопасности от техногенных катастроф. Однако для реального использования спутниковых наблюдений требуется интеграция спутниковых данных и результатов их обработки с другими данными, уже использующимися в системах мониторинга окружающей среды.

Современный этап развития спутниковых методов наблюдения Земли открывает возможности построения систем мониторинга в задачах, которые требуют регулярно обновляемой информации о состоянии экосистем и происходящих в них динамических процессах. Реализованными примерами использования спутниковой информации являются система мониторинга лесных пожаров; мониторинг

вырубок лесов; мониторинг сельскохозяйственных земель; мониторинг состояния окружающей среды урбанизированных территорий. На основе оперативной работы со спутниковыми данными развиваются система спутникового метеорологического мониторинга, система мониторинга чрезвычайных ситуаций. Спутниковый мониторинг обеспечивает получение «сырых» спутниковых данных и после обработки данных дистанционного зондирования — получение законченных тематических информационных продуктов. Термин «информационные продукты» относится к результатам обработки и интерпретации космических снимков. Продукт представляет собой реальные данные космических наблюдений, которые могут быть заказаны пользователем и переданы ему. Например, тематическими информационными продуктами спутникового мониторинга являются карты тайфунов в тихоокеанском регионе; карты температуры поверхности океана и карты течений; электронные карты температуры подстилающей поверхности мегаполиса Москвы, на которых представлены результаты диагностики из космоса выбросов тепловых электростанций в Москве и обнаружение дымовых шлейфов тепловых электростанций.

После появления интернета и бурного развития новейших информационных технологий начался современный этап создания распределенных информационных ресурсов в области дистанционного зондирования Земли и космического мониторинга состояния окружающей среды. Web-технологии обеспечивают возможность разработки принципиально новых средств для доступа к данным, поиска и идентификации ресурса, заказа и распределения спутниковой информации.

В последние годы возникла проблема создания единой электронной среды информационного взаимодействия, в которой использование распределенных информационных систем и сетевое взаимодействие создают принципиально новые возможности. Сетевая интеграция обеспечивает возникновение хранилищ информационных спутниковых ресурсов. При обработке и анализе данных дистанционного зондирования определяющую роль играет создание и представление услуг удаленным пользователям, поддержка свободного распределенного доступа к крупномасштабным инфраструктурам, объединяющим распределенные интерактивные цифровые архивы.

2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим актуальные задачи формирования электронной среды взаимодействия для объедине-

ния электронные архивов и on-line-каталогов данных. За рубежом на основе GRID-технологий, e-infrastructure and e-collaboration началось формирование распределенной информационной инфраструктуры спутниковых данных, вызванное расширением использования спутниковой информации в международных программах экологического мониторинга и предупреждения техногенных катастроф. Это прежде всего такие программы, как Global Monitoring for Environment Security (GMES), Global Earth Observation System of Systems (GEOSS).

Национальная программа Spatial Data Infrastructure (SDI) в США была начата распоряжением президента Клинтона от 13 апреля 1994 г. «Координация в области получения и доступа к данным: национальная инфраструктура пространственных данных». Годовой бюджет программы SDI составляет 3.6 млн долларов. Федеральный комитет по географическим данным США (FGDC) — координатор программы, в которой участвуют 18 министерств. Аналогичные проекты теперь создаются в Китае — Geospatial Data Infrastructure, в Канаде — Canadian Geospatial Data Infrastructure (CGDI), в Испании — Spanish National Spatial Data Infrastructure (<http://www.idee.es>), в Индии — Indian National Spatial Data Infrastructure.

Новую фазу активной разработки инфраструктуры SDI вызвало формирование Global SDI Association и инициатива Европейской Комиссии — Программа INSPIRE — Infrastructure for Spatial Information in Europe (<http://www.inspire.org>), развивающая European Spatial Data Infrastructure (ESDI). Национальные инфраструктуры (National SDI) формализуют структуру и процесс организации, использования и распределения геопространственных данных для широкого спектра приложений и пользователей внутри страны. Концепция NSDI была признана всего несколько лет назад. Первые NSDI установлены в Великобритании, Австралии, Новой Зеландии, Японии, Корее и Канаде, а позже — более чем в 60 других странах.

Программа INSPIRE (2004—2013 гг.) Европейского Сообщества разрабатывает распределенную инфраструктуру географических данных в интересах защиты окружающей среды в Европе, мониторинга природных ресурсов и природных катастроф. Компонентами INSPIRE являются метаданные, коллекции и сервисы данных; сетевые сервисы и технологии; а также соглашения о распространении, доступе и использовании данных; механизмы координации и мониторинга.

Стандартизующими организациями в программах SDI являются Open Geospatial Consortium (OGC), ISO TC/211 и W3C. Базовые стандарты разрабатывает Open Geospatial Consortium. Представление спутниковых данных основано на международных

открытых стандартах International Standards Organization (ISO) / TC 211 — Geographic information / Geomatics, разрабатываемых в кооперации W3C, Open Geospatial Consortium (OGC), European Committee for Standardization (CEN) / TC 287 — Geographic Information, Federal Geographic Data Committee (FGDC).

ISO/TC 211 объединяет 50 национальных организаций и сотрудничает с 25 международными комитетами по стандартизации. Деятельность ISO/TC 211 сконцентрирована на разработке стандартов географических данных. ISO/TC 211 имеет объединенную Рабочую группу Joint Advisory Group (JAG) с Open Geospatial Consortium (OGC), поддерживающей разработку Open GeoSpatial Software Interfaces (интерфейсов и открытого программного обеспечения).

Первое поколение стандартов 1994—2004 гг. состояло из семейства двадцати интегрированных стандартов на географические данные. Второе поколение стандартов ISO/TC 211 объединяет стандарты на космические снимки — изображения (imagery) и сервисы. Наиболее известные стандарты включают стандарты на метаданные ISO 19115-Metadata Standard, на язык разметки географических данных ISO 19136 Geography Markup Language и стандарт на картографический сервер ISO 19128 Web Mapping Server Interface WMS, разработанный и введенный Open Geospatial Consortium для стандартизации в ISO.

Общими целями программ SDI и INSPIRE являются обеспечение координированного распределенного доступа к спутниковым информационным ресурсам; поддержка решения фундаментальных и прикладных задач по ДЗЗ из космоса и экологическому спутниковому мониторингу. В настоящее время на базе инфраструктуры SDI и программы INSPIRE интенсивно развиваются системы, обеспечивающие отображение информационных ресурсов ДЗЗ и спутниковой информации экологического мониторинга в интернете. Многолетний опыт получения, хранения и обработки спутниковых данных, практика предоставления обработанных спутниковых данных многочисленным пользователям этих данных, показывает неуклонно возрастающее количество потенциальных пользователей спутниковой информации и все большее разнообразие запросов каждого конкретного пользователя на тот или иной вид обработки спутниковой информации. Такая тенденция связана с постепенным развитием задач, стоящих перед пользователями спутниковой информации, с развитием технических средств для получения спутниковой информации, главным образом с появлением нового поколения спутников и спутниковых приборов, позволяющих конечному пользователю привлекать для решения своих задач

новые виды спутниковой информации.

Спутники обеспечивают глобальный, постоянный и надежный мониторинг окружающей среды, включая атмосферу, сушу и океан. Оперативное обеспечение потребителей достоверной экологической информацией, возможность получать природно-ресурсную информацию в реальном масштабе времени и свободный доступ к экологической информации.

Методы дистанционного зондирования Земли играют решающую роль в международных геосферно-биосферных программах исследования изменений окружающей среды и климата. Прежде всего это Global Earth Observation System of Systems (GEOSS), объединившая Программу GMES, Программу глобального изменения климата IGOS (Integrated Global Observing Strategy), изучающую взаимосвязанные физические процессы в атмосфере, океане, на поверхности Земли и в полярных регионах; Программу DMSP (Disaster Manager), направленную на предупреждение опасности стихийных бедствий. Программа GMES развивается Европейским космическим агентством и Европейской комиссией и поддерживает глобальный экологический мониторинг и усилия европейского сообщества, направленные на устойчивое развитие. Инициатива GMES сосредоточена на качестве данных и информации в таких важных для Европы областях, как сельское хозяйство, леса, рыбный промысел.

Эффективное использование космической информации для изучения и мониторинга состояния и динамики природных объектов и техногенных процессов зависит от того, насколько доступны научному сообществу спутниковые данные и информационные ресурсы, созданные при исследовании Земли из космоса. Региональный аспект исследований окружающей среды важен как для понимания связей между изменениями региональных компо-

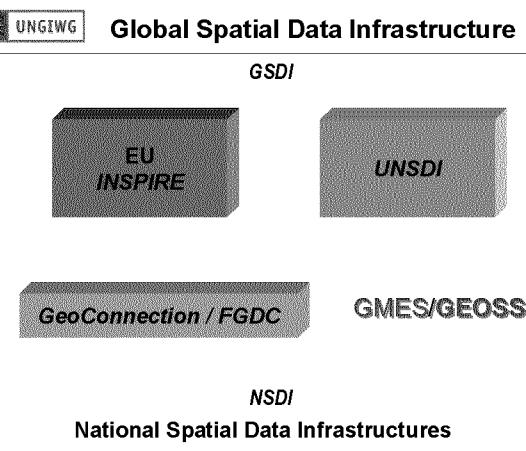


Рис. 1. Инфраструктура программ SDI

нентов и их последствиями на глобальном уровне, так и для поведения системы Земля в целом.

Рис. 1 иллюстрирует инфраструктуру Программ SDI: от национального уровня National SDI до международного уровня Global Spatial Data с представлением европейской программы INSPIRE, программы ООН UN SDI, программы GMES/GEOSS и задач Федерального комитета США по географическим данным FGDC. Эффективное использование космической информации для изучения и мониторинга состояния и динамики природных объектов и техногенных процессов зависит от того, насколько доступны научному сообществу спутниковые данные и информационные ресурсы, созданные при исследовании Земли из космоса. Спутниковые методы исследования окружающей среды важны как для понимания связей между изменениями региональных экосистем и их последствиями на глобальном уровне, так и для поведения экосистемы Земли в целом.

3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ INFEKO И EOSDIS

Известны мировые системы спутниковой информации, оперирующие огромными массивами спутниковых данных о состоянии природной среды. В США построена многоуровневая система сбора, обработки и хранения данных EOS (Earth Observing System) — Исследование Земли из космоса и распределенная информационная система спутниковых данных EOSDIS (EOS Data and Information System), объединяющая активные архивы данных, получаемых со спутников. Данные дистанционного зондирования Земли, управляемые системой EOSDIS, доступны из восьми распределенных центров. Распределенные центры системы EOSDIS изначально были ориентированы на раздельное хранение данных по разным научным направлениям Программы «Исследования Земли из космоса EOS».

Центр NASA/Langley собирает, обрабатывает, архивирует и распределяет спутниковые данные по аэрозолям, облакам и тропосферная химия. Центр ASF на Аляске — полярные исследования и радарные данные. Центр EROS — данные по атмосфере, земной поверхности и взаимодействию океана и суши. NASA/Goddard Центр: верхняя атмосфера, глобальная биосфера. Лаборатория реактивного движения JPL: физическая океанография. NSIDC (National Snow and Ice Data Center) в Колорадо — снег и лед, криосфера и климат. Национальная Лаборатория Oak Ridge — данные по биохимии. Центр в Алабаме — глобальная гидрология.

Европейское космическое агентство (ESA) разработало информационную систему спутниковых данных INFEKO (Information on Earth Observations),

являющуюся активным многоцелевым архивом космической информации на базе портала ESA (<http://eoportal.org/>). Для интеграции географически удаленных спутниковых архивов решена задача, как обеспечить работу пользователей с данными, которые получаются из различных источников и имеют разную структуру хранения. Была создана информационная система, в которой обеспечена возможность взаимодействия разнородных сервисов и каталогов данных. Основной результат состоит в том, что при запросе в единой точке системы поиск данных осуществляется единым запросом одновременно в ресурсах распределенных мировых каталогов. INFEKO ориентирована на работу со спутниковыми данными и объединяет спутниковые архивы. Активный многоцелевой архив космической информации INFEKO развивается Европейским космическим агентством в сотрудничестве с Italian Space Agency (ASI), French Space Agency (CNES), German Space Agency (DLR), European Union Satellite Centre (EUSC) и консорциумом Open Geospatial Consortium (Open GIS) как единая система поиска по всем архивам данных. Система INFEKO предлагает доступ к данным и сервисам Earth Observation, и каталогам данных по всему миру. Позволяет производить поиск спутниковых снимков и коллекций данных.

4. ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РОССИЙСКИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Разрабатываемая информационная инфраструктура должна состоять из данных, принадлежащих различным спутниковым центрам, и обеспечивать эффективный доступ, поиск и получение самой последней, наиболее актуальной спутниковой информации. Реализация информационной инфраструктуры включает формирование единого центра хранения спутниковых данных; интеграцию информационных систем спутникового мониторинга; использование общепринимемых мировых технологий и стандартов (Internet, WWW, Semantic Web, Grid); единую административную политику доступа к данным. Информационная и инфраструктура в нашем проекте создавалась на основе единых стандартов интернета: репозитарии, Web-сервисы, XML. Поддерживается работа конечных пользователей со спутниковыми данными, которые получаются из различных источников и имеют разную структуру хранения. Сбор и обработка различных типов спутниковых данных происходит совершенно независимо; системы хранения данных могут находиться не только на разных серверах, но и в различных удаленных центрах.

Информационная инфраструктура в комплексе

рассматривает такие вопросы, как технологии организации доступа, интерфейс с пользователями, политика администрирования с данными, средства доступа и технологии распределенного хранения данных. Поддерживается идентификация каталогов спутниковых данных, организация доступа к данным и сервисам, обнаружение и запрос информационных продуктов спутникового мониторинга, предварительно обнаруженных в опознанных коллекциях.

Создание информационной инфраструктуры спутниковых данных позволяет осуществлять систематизированное хранение данных спутникового мониторинга, проводить обновление географических баз данных, обеспечить удаленный доступ к информации исследователей, выполняющих работы в данной области.

Основной целью нашего проекта является исследование научных приложений в распределенной информационной среде для интеграции цифровых архивов спутниковых данных с международными системами обмена космической информацией INFE0 (Information about Earth Observation) и EOSDIS (EOS Data Information System). Разрабатываемый проект объединяет информационные ресурсы космического экологического мониторинга в единую информационную среду. Значительно сокращается время доступа к данным орбитального мониторинга природной среды. Использование спутниковой информации обеспечит многогранную трактовку динамики происходящих на Земле процессов, расширит изучение и прогноз природных кризисов и катастроф, позволит уменьшить ущерб от нежелательных последствий стихийных и техногенных явлений.

В отличие от системы распределенных Центров в EOSDIS (США), здесь мы отказались от сепаратного накопления космических данных по индивидуальным разделам науки, по конкретным проектам или отдельным космическим миссиям. Проект обеспечивает интеграцию спутниковых данных междисциплинарных исследований Земли из космоса, организацию к ним доступа и представление информации в распределенной информационной среде на основе интернет-технологий.

Поддерживается интеграция разрозненных региональных спутниковых архивов в единую информационную среду космического экологического мониторинга. Каталоги спутниковых данных региональных центров экологического мониторинга Сибири, Дальнего Востока, Арктики и Москвы будут интегрированы в мировую систему центров космической информации. Пользователь получает возможность распределенного доступа к данным региональных и международных центров космического мониторинга.

Объем информационных ресурсов в разрабатываемом проекте можно оценить на примере регио-

нального архива спутниковой информации во Владивостоке. В 2000 г. спутниковый архив Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) достигал объема 30 Гбайт. Развитие средств регионального спутникового мониторинга привело к резкому возрастанию потока спутниковых данных. В 2003—2006 гг. архив был пополнен данными со спутников NOAA, TERRA (MODIS), 36 каналов, GMS-5, FY-1C и FY-1D. Объем данных 72.6 Гбайт с геостационарных спутников GMS-5 и FY-2B; 63 Гбайт — со спутников NOAA. Проект ориентирован на создание средств коллективной работы с информационными ресурсами; поддерживается доступ удаленных пользователей к спутниковым данным и распределенный поиск данных. В разрабатываемом проекте метаданные будут использоваться для каталогизации спутниковых данных, поиска и вывода результатов поиска. Для обеспечения наиболее полного соответствия хранимой информации запросам пользователя определен список свойств (атрибутов) хранимых данных:

- набор метаданных для описания спутниковых данных включает краткое описание ресурса. Для каждого космического снимка будут храниться описывающие их метаданные. При реализации в системе хранения и поиска большого количества атрибутов метаданных становится возможным осуществлять более узкий поиск хранимой в архиве данных;

- метаданные космических снимков содержат следующие атрибуты: дата и время приема изображения; покрываемая снимком территория (может описываться как координатно, так и по названию местности); название спутника; идентификатор прибора; разрешение (в км) изображения; количество каналов (отсчетов на пикセル) в изображении; номера каналов, вошедших в данную выборку; данные, описывающие орбиту спутника.

Рассматриваемый проект решает задачу создания единой информационной среды [1—3], предоставления единой точки доступа для поиска данных по всем спутниковым архивам и каталогам, независимо от их географического расположения и внутреннего формата данных. Возможность взаимодействия гетерогенных сервисов и каталогов данных в рамках единой информационной системы основана на свойстве интероперабельности.

Технологии распределенной информационной системы INFE0 дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используют сеть узлов Middleware Nodes (MWNDs) (см. рис. 2). Каждый из узлов MWNDs содержит метаданные коллекций, доступ к которым предоставляется через шлюзы (Gateways). Пользователь для поиска данных обращается к системе через WWW-сервер на одном из узлов MWND, где формируется распределенный запрос, рассылаемый

релевантным шлюзом. Результаты выполнения запроса объединяются и возвращаются пользователю.

Gateway представляет собой промежуточное звено между узлом MWND и каталогом или спутниковым архивом. Gateway обменивается сообщениями по протоколу CIP (Catalogue Interoperability Protocol) с узлом MWND, получая от него поисковые запросы и возвращая ему результаты поиска. Запросы передаются транслятору RDBMS, который преобразует их в SQL-запросы для непосредственного поиска в базе данных, либо формирует запрос для обращения к предоставляемому сервису (Web Map Server и т. п.).

Взаимодействие пользователей и каталогов данных ДЗЗ регламентирует протокол CIP. Для поддержки одновременного доступа пользователя к множеству каталогов используется трехуровневый принцип распределения запросов. Пользователь через web-интерфейс задает поисковый запрос и посыпает его к узлу MWND, который направляет запрос множеству серверов каталогов данных. После завершения процедуры поиска ответы поступают на узел MWND, через который пользователь получает объединенный результат поиска.

Существует несколько стандартов, пригодных для поиска и извлечения информации в распределенных информационных системах (HTTP, Gopher и т. п.). Протокол Z39.50 имеет важное преимущество, ставшее решающим при выборе базового протокола для CIP. Преимущество заключается в том, что форма представления результатов поиска, как и способ ввода поисковых запросов, не зависит от источника информации. Это определяется тем, что Z39.50 использует качественно иную модель взаимодействия пользователя и поисковой системы, по-

зволяющую абстрагироваться от способа организации конкретной базы данных, сделать доступ к ее содержанию независимым от формы хранения последнего. Поисковые запросы всегда адресованы не к реальной базе данных, а к абстрактной. Эта абстрактная БД не имеет структуры и характеризуется только поисковыми атрибутами. При таком подходе к процедуре поиска все базы данных становятся для клиента одинаковыми, если поддерживают один и тот же набор поисковых атрибутов.

Различные вычислительные системы используют различные средства и методы описания, хранения и доступа к данным. Протокол Z39.50 избавляет пользователя от необходимости адаптации к каждому из источников информации. Z39.50 представляет собой общую абстрактную структуру для поиска и получения информации, требующую дополнительной настройки для каждой конкретной области применения. Возможность осуществления таких настроек — профилей, является одним из основных преимуществ протокола. Итак, протокол CIP является профилем Z39.50, ориентированным на работу с данными ДЗЗ.

Протокол CIP поддерживает концепцию параллельных операций. Это позволяет пользователю инициировать несколько поисковых запросов одновременно: нет необходимости дожидаться окончания выполнения предыдущей операции (получения ответа, соответствующего запросу), чтобы сделать следующий запрос.

Протокол CIP определяет разные принципы представления метаданных для пользователей и для поставщиков данных. Для пользователей базовой единицей структуры данных является понятие архива, для поставщиков — понятие коллекции.

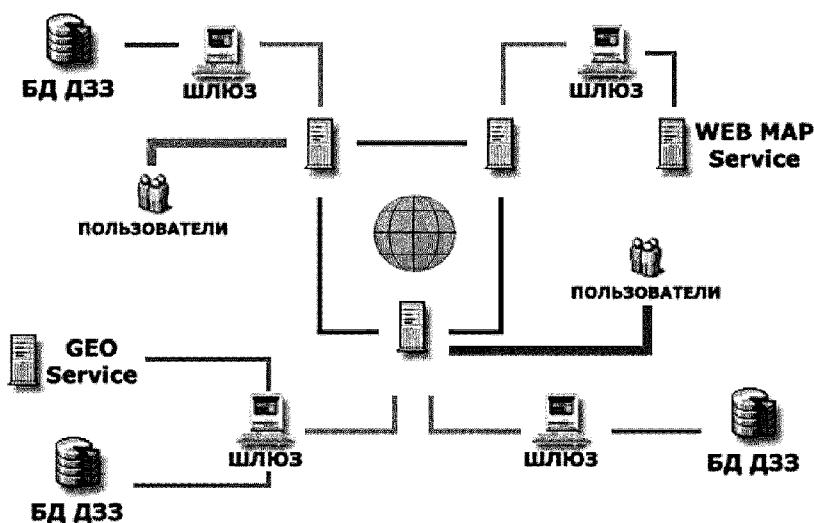


Рис. 2. Схема работы распределенной информационной системы

Архив может содержать различные типы данных: спутниковые изображения, результаты обработки изображений, температурные карты, статистические данные, алгоритмы их обработки, документацию и т. д. Коллекция — группа данных, объединенных на основе каких-либо общих атрибутов. Эти атрибуты являются описанием коллекции, которое может быть использовано для формирования дополнительных критерий поиска. Коллекция может содержать как описания (дескрипторы) конечных данных, так и описания других коллекций, образуя сложную иерархию коллекций. Все типы коллекций поддерживают поисковые методы, определенные стандартом CIP, а именно:

— *поиск коллекций*. Этот метод используется для поиска коллекций, удовлетворяющих заданным условиям (время, координаты, тип датчика и т. п.) Результат поиска может быть использован для дальнейшего поиска с измененными условиями;

— *поиск данных*. Этот метод используется для поиска дескрипторов, указывающих на конечный продукт — данные ДЗЗ.

Пользователь может дополнительно задавать область поиска: выполнять поиск только в одном каталоге (локальный поиск) или задать распространение поискового запроса на другие каталоги и архивы (распределенный поиск).

- Кудашев Е. Б., Филонов А. Н. Интегрированная распределенная информационная система спутниковых данных в программах исследования Земли из космоса // Тр. Восьмой Всероссийской науч. конф. (RCDL 2006) «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции», Сузdal, 17–19 октября 2006. — Ярославль: Ярославский гос. ун-т им. П. Г. Демидова, 2006.—С. 131–139.
- Кудашев Е. Б., Филонов А. Н. Геоинформатика на WEB: от локальных БД к распределенным информационным системам спутниковых данных // Тр. Всероссийской конф. «Научный сервис в сети интернет: технологии параллельного программирования», Новороссийск, 18–23 сентября 2006 г. — М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006.—С. 196–198.
- Kudashev E. B., Filonov A. N. Environmental Monitoring Digital Library: Improving the accessibility of the Russian Satellite data // EnviroInfo Brno 2005. Informatics for Environmental Protection: Proc. of the 19th International Conf. Informatics for Environmental Protection, September 7–9, 2005. — Masaryk University in Brno, Czech Republic. 2005.—P. 230–238.

DISTRIBUTED ACCESS AND SEARCH FOR THE SATELLITE DATA OF REMOTE SENSING

E. B. Kudashev, A. N. Filonov

We consider the emerging standards designed for the elaboration of distributed service-oriented environments. The project of integration of the Russian Satellite data archive in International Information Systems of Remote Sensing is observed as an example.

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9; 520.86

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Физика и экология системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера

Представлено 25.06.07

Обґрунтовано, що утворення Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) є складною відкритою динамічною нелінійною системою. Сформульовано основні положення системної парадигми. Показано, що високоенергійні явища в системі викликають у ній комплекс, як правило, нелінійних процесів, передбудову характеру взаємодії підсистем. Обговорюються екологічні наслідки аварій, катастроф і регіональних війн у системі ЗАІМ.

ВВЕДЕНИЕ. СИСТЕМНАЯ ПАРАДИГМА

Цель данной работы — обоснование необходимости системного подхода к образованию Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) и изучению процессов в нем. Статья представляет

собой краткий обзор результатов исследований автора, выполненных в последние годы.

Важнейшим достижением физики Земли, атмосферы и геокосмоса явилось осознание того факта, что качественно новое понимание наблюдаемых процессов во всех геосферах и построение их физи-

ко-математических моделей невозможно в рамках прежней парадигмы. Новая — системная — парадигма в четком виде сформулирована в 1980-х гг. автором [1, 7]. Ценность и плодотворность новой парадигмы состоит в том, что она предполагает рассмотрение образования ЗАИМ как открытой динамической нелинейной системы. Между подсистемами существуют прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. В систему как «сверху», так и «снизу» поступают излучение, вещества, энергия и негэнтропия. Негэнтропия поддерживает систему в неравновесном состоянии и обеспечивает протекание диссилативных процессов. Образование ЗАИМ — динамическая система. Ее параметры изменяются во времени и пространстве. Энергетика естественных и антропогенных процессов в системе ЗАИМ и ее подсистемах — значительна [1—7, 15]. Поэтому система описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Обмен между подсистемами излучением, веществом, энергией и негэнтропией столь велик, что система способна находиться в состояниях, далеких от равновесия. Для нелинейных систем характерны сложность процессов, множественность состояний, возможность возникновения детерминированного хаоса, самоорганизации, проявление триггерных эффектов, возникновение новых не присущих подсистемам свойств у системы и т. п. Нелинейным системам свойственны саморазвитие, усложнение и совершенствование за счет потребления внешних ресурсов.

ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЗАИМ

Выбросы корональной массы (СМЕ) и солнечные вспышки формируют состояние космической и, по-видимому, атмосферной погоды. В системе ЗАИМ им сопутствует комплекс физических процессов, называемый геокосмической бурей. Энергия и мощность возмущенного солнечного ветра может достигать 10^{17} Дж и 10^{14} Вт [1, 7, 19]. Вспышки и СМЕ сопровождаются ростом интенсивности оптического, рентгеновского, корпускулярного излучений и солнечного ветра. При этом в систему ЗАИМ внедряется энергия $\sim 10^{16}$ Дж, электронная концентрация N в D-области ионосферы увеличивается на 1–2 порядка, возникают сильные геомагнитные возмущения (их энергия и мощность $\sim 10^{10}$ Дж и ~ 500 ГВт), а также генерируются волновые возмущения (в частности, акустические волны, внутренние гравитационные волны — ВГВ) в атмосфере, ионосфере и магнитном поле.

Геокосмические бури. Этот термин объединяет магнитную, ионосферную, атмосферную и электрическую бури, вызванные воздействием на систему

ЗАИМ возмущенного солнечного ветра. Энергетика бури — велика [1, 7, 17, 20—22]. Используя наши измерения, автор проанализировал эффекты геокосмических бурь в диапазоне высот ~ 60 –1000 км, имевших место в течение цикла солнечной активности (1995–2006 гг.). Изучено вызываемое ими взаимодействие подсистем [17, 20—22]. Энергия солнечного ветра из магнитосферы по силовым линиям в виде электрических полей, потоков частиц и плазмы проникает в ионосферу и атмосферу, вызывая их нагрев, расширение и подъем. При этом возмущается система термосферных ветров, возникает перестройка химических реакций, генерируются и перемещаются волновые возмущения в атмосфере и ионосфере. Важно, что в волне $\Delta N/N$ может достигать 50 %. Такие волны относятся к нелинейным. В волновых пакетах (солитонах, уединенных волнах) преобладают гармоники с $T \approx 40$ –120 мин, их скорость составляет 0.5–1 км/с.

Важно, что во время бурь среднеширотная ионосфера приобретает свойства высокоширотной ионосферы (возникает диффузность, усиливается ионосферно-магнитосферное электрическое поле и др.).

Затмение Солнца (ЗС). Это явление также обладает значительной энергетикой и вызывает комплекс физико-химических процессов на всех высотах и перестройку атмосферы и геокосмоса в течение 2–4 ч. Усиливается атмосферно-ионосферное, ионосферно-магнитосферное и ионосферно-плазмосферное взаимодействия [1, 7, 8].

Автором проанализированы эффекты в системе ЗАИМ, сопровождавшие четыре частных ЗС, имевших место вблизи г. Харькова: 11 августа 1999 г. (степень покрытия 73 %), 31 мая 2003 г. (64 %), 3 октября 2005 г. (24 %) и 29 марта 2006 г. (77 %). Например, во время затмения Солнца 11 августа 1999 г. имели место значительные (на 10–50 %) уменьшения N при $z = 70$ –350 км, малоинерционное уменьшение температуры электронов, достигшее 400–600 К при $z = 200$ –700 км, и инерционное уменьшение температуры ионов T_i от 100 до 600 К на высотах 400–700 км. Высыпание электронов привело к росту N на высотах 81–87 км через 100–40 мин после начала затмения. Время становления T_i составляло 40–20 мин соответственно. Во время ЗС исходящий поток плазмы из плазмосферы достиг значений $-2.5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а до и после ЗС восходящие потоки составляли $(1$ – $2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [1, 7].

Солнечный терминатор (СТ). Граница раздела день–ночь является мощным источником возмущений в атмосфере и геокосмосе [1, 7, 9–11]. СТ приводит к перестройке ионосферно-плазмосферного и ионосферно-магнитосферного взаимодействий,

вызывает высыпание частиц из радиационного пояса в нижнюю ионосферу, генерирует волновые процессы в Е- и F-областях ионосферы и т. д. Относительная амплитуда $\Delta N/N$ этих процессов может достигать 20—30 %. Продолжительность волновых возмущений 1—3 ч, период $T \approx 15$ —60 мин.

Метеорные потоки (МП). Приток метеорного вещества приводит к нагреву атмосферного газа, увеличению N в Е-области ионосферы, существенному в ночное время, к генерации возмущений магнитного поля и ионосферного электрического поля и т. п. Эти эффекты относятся к эффектам интегрального типа. Результаты их расчета приведены в [1, 7].

Грозовая активность. Энергия и мощность молний достигают 10^{10} Дж и 10^{10} Вт [1, 7]. Мощность P_{em} ОНЧ-излучения молний составляет 10^6 — 10^7 Вт, плотность потока энергии в магнитосфере — 10 — 100 мкВт/м². Таких значений достаточно для перестройки ионосферно-магнитосферного взаимодействия, стимуляции высыпания заряженных частиц из радиационного пояса в результате развития циклотронной неустойчивости и генерации волн.

На Земле одновременно происходит около 2000 гроз, площадь каждого очага порядка 1000 км². При этом $P_{em} \sim 1$ — 10 ГВт. Мировая грозовая активность осуществляет «подпитку» подсистем в системе ЗАИМ, стимулируя взаимодействие между ними.

Локальные эффекты гроз сводятся к нагреву нижней ионосферы, высыпанию энергичных частиц, свечению атмосферы, генерации акусто-гравитационных волн (АГВ) и другим эффектам [1, 7].

Мощные атмосферные процессы. Наиболее ярким и мощным атмосферным процессом является тропический циклон (ТЦ). Рассмотрены три механизма воздействия ТЦ на верхнюю атмосферу и геокосмос: акусто-гравитационный, электромагнитный и квазистатический [6]. Вычислены плотности потока энергии инфразвуковых волн и ВГВ. Мощность излучения ВГВ для сильнейшего ТЦ достигает 10^{11} — 10^{12} Вт. В то же время мощность излучения ВГВ всеми горными системами планеты (мощность орографических возмущений) составляет в среднем около 10^{11} Вт.

Интересным результатом является возможность генерации возмущений геомагнитного поля не только на частоте ВГВ (что естественно), но и на удвоенной частоте в результате нагрева газа диссирируемой на высотах 80—200 км ВГВ. Важно, что этот вывод подкрепляется результатами наблюдений возмущения давления, имевших составляющие

с периодами T около 2 и 1 ч. При этом возмущения D-компоненты геомагнитного поля содержали составляющие с периодами 1 и 0.5 ч. Время запаздывания вариаций геомагнитного поля на удвоенной частоте по сравнению с изменениями давления воздуха на поверхности должно быть около 55÷60 мин. Установлено, что наиболее вероятное значение периода ВГВ составляло 1.5 ч. Показано, что интенсивность излучения резко увеличивается в окрестности частоты, которой соответствует период 1.45 ч (при турбулентных пульсациях скорости ветра 6 м/с и радиусе вихря 500 км).

На высотах 100÷150 км ВГВ становятся нелинейными, здесь скорость частиц в волне сопоставима со скоростью звука. Имеет место диссипация энергии этих волн, что способствует возникновению целого комплекса динамических и тепловых эффектов. К ним относятся: всплытие нагретого воздуха, развитие гидродинамической неустойчивости в атмосфере, интенсификация турбулентности, возбуждение струйного течения и диссипативных структур, неустойчивость АГВ, стимулированная значительным увеличением электрического поля на ионосферных высотах, генерация АГВ-вихрей и др.

Возникновение электромагнитного излучения ТЦ обусловлено грозовой деятельностью в ядре циклона. Генерируемое при этом ОНЧ-излучение эффективно взаимодействует с запасенными в радиационном поясе электронами. Оценки триггерного эффекта высыпающихся частиц выполнены в [6, 7].

Механизм генерации квазистатических возмущений электрического поля и результаты соответствующих наблюдений обсуждаются в [6, 7]. В этих работах указаны причины увеличения тока в при водной атмосфере. По-видимому, его рост обусловлен активизацией процесса образования и электризации аэрозолей в результате значительного усиления ветра в развивающемся циклоне.

До последнего времени роль крупномасштабной термодинамической неустойчивости и электрических процессов в ТЦ недооценивалась. Расчеты автора показали, что электрические силы могут быть не только существенными, но и определяющими [6, 7]. Последняя ситуация может возникнуть в циклоне лишь тогда, когда плотность заряда $Q \geq 1 \text{ мККл/м}^3$, а плотность тока $j_a \geq 0.1 \text{ мКА/м}^2$. В этом случае воздействие ТЦ на ионосферу и магнитосферу тоже должно увеличиться, так как $j_a/j_{a0} \geq 10^5$. При достаточно больших значениях Q воздух в ТЦ ведет себя как плазмоподобная среда, помещенная во внешнее магнитное поле. В такой среде следует ожидать появление вихрей электромагнитной природы, волновых низкочастотных процессов, электрических структур, неустойчивос-

тей и т. д. В результате развития таких процессов возникают новые каналы воздействия циклона на ионосферу и магнитосферу.

Сильные землетрясения (ЗТ). Энергия сильнейшего ЗТ около 10^{19} Дж, мощность — 10^{17} Вт. Сейсмические процессы сопровождаются генерацией электромагнитного излучения в диапазоне частот $f \leq 1$ МГц, квазистатических электрических и магнитных полей, инфразвука и ВГВ. Их энергетика — значительна [1, 7]. Сильные землетрясения также вызывают комплекс процессов в системе ЗАИМ, которые носят крупномасштабный и глобальный характер. Примерами таких процессов являются: генерация и распространение волновых возмущений, стимулированное высapsulation электронов, усиление уровня шумового радиоизлучения, турбулизация атмосферы и ионосферы и др.

Вулканизм. Извержение вулканов (ИВ) относится к одному из высокоэнергичных источников, способных существенно повлиять на систему ЗАИМ. Энерговыделение для сильнейшего ИВ достигает 10^{20} Дж, а средняя мощность — 10^{15} Вт. Для взрывных вулканов в энергию воздушных волн переходит около 0.01 %, т. е. 10^{16} Дж, их мощность составляет 10^{14} — 10^{15} Вт. Примерно такая же энергетика ЗТ, сопровождающего ИВ.

Эффекты, возникающие при ИВ, отчасти подобны тем, что сопутствуют ЗТ. Однако есть и существенное отличие. ИВ приводит к выбросу большого (~ 10 — 100 км 3) количества пепла, вулканических газов (прежде всего CO₂) и аэрозолей с размерами 0.1—1 мкм. Попав в стрatosферу (высоты 20—30 км), эти частицы находятся там от 0.5 года до 3 лет. Выбросы CO₂ усиливают парниковый эффект. Запыление стратосферы способствует поглощению и рассеянию солнечного света, в результате чего поверхность Земли недополучает значительное (до 10^{23} — 10^{25} Дж) количество теплоты. На Земле наступает «вулканическая» зима. В системе ЗАИМ явление вулканизма относится к триггерным. В работах [1, 7] показано, что коэффициент триггерности достигает 10^6 .

Таким образом, извержения сильнейших вулканов приводят к существенной и длительной (~1 года) перестройке теплового (и не только теплового) режима в системе ЗАИМ.

АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В СИСТЕМЕ ЗАИМ

Активные эксперименты (АЭ) оказались удобными для изучения образования ЗАИМ как системы и взаимодействия его подсистем. При этом становится возможным дозировать величину энерговыделения, его время и место.

Воздействие мощного радиоизлучения (МР).

Этот источник оказывается наиболее удобным для проведения АЭ, он оказывает только электромагнитное воздействие на плазму и является экологически «чистым». Выполнен анализ измерений, проведенных нами в 1972—2000 гг. (более 3000 ч наблюдений [1, 7]). Для воздействия на систему ЗАИМ использовались установки, удаленные от места наблюдения (г. Харьков) на расстояния $R \approx 100, 700, 1100, 2000$ и 10000 км. Их эффективная мощность составляла 10—380 МВт, $f = 1$ —8 МГц.

Автором экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения интенсивных (100—1000 %) крупномасштабных и слабых (1—10 %) глобальных аperiодических возмущений N в нижней ионосфере и волновых возмущений в средней ионосфере, сопровождаемых вариациями геомагнитного поля, стимулированных воздействием на ионосферу мощного нестационарного радиоизлучения декаметрового и гектометрового диапазонов. Процессы в нижней ионосфере связаны с перестройкой взаимодействий в системе ЗАИМ и высapsulationом частиц из радиационного пояса, в средней ионосфере — с генерацией и распространением волн плотности с периодом 10—30 мин, продолжительностью 1—2 ч и скоростью 0.5—0.7 км/с. При этом $\Delta N/N = 1$ —10 % [1, 2].

Старты и полеты космических аппаратов. Ракеты с включенными двигателями оказывают на среду гидродинамическое, тепловое, электромагнитное, акустическое и химическое воздействия. В результате возникают геофизические, радиофизические, оптические и другие эффекты. Автором выполнен анализ наших измерений для более чем 400 стартов КА (более 20 типов ракет мощностью 10^7 — 10^{11} Вт) с 12 космодромов, 55 посадок КА и падений трех орбитальных станций [1, 7, 9, 12, 13, 16, 18]. Имели место и аварийные запуски КА. Установлено, что старты КА могут вызывать крупномасштабные и глобальные возмущения в системе ЗАИМ, перестраивать взаимодействия между ее подсистемами. Определены типы волн, переносящие возмущения.

Мощные взрывы. Автором проведен анализ результатов наших наблюдений, выполненных в 1980-х гг. Взрывы производились в СССР (полигоны Н. Земля, Семипалатинск, Капустин Яр), США (полигон Невада) и Китае [1, 7]. Энерговыделение при подземных ядерных взрывах (всего 55) изменилось примерно от 1 до 200 кт, при химических взрывах (всего 11) — от 1 до 10 т и подрывах ракет СС-20 (всего 24) — от 0.01 до 0.1 кт. Выполнен также анализ наблюдений за взрывом КА «Челленджер» 28 января 1986 г. в 08.39 УТ у мыса Канаверал, химическим взрывом (0.12 кт) в Арза-

масе-16 4 июня 1988 г. в 05.40 УТ и химическим взрывом (0.01 кт) в Павлограде 12 мая 1988 г. в 03.15 УТ. В этих наблюдениях $R \approx 200$ —10000 км. Лучше других регистрировались возмущения с $v = 0.3$ —0.7 км/с (в нижней и средней ионосфере соответственно) и только при $R \leq 1000$ км. Сравнительно редко наблюдались возмущения с $v = 2$ —4 км/с при $R \sim 1000$ —10000 км. Еще реже отмечались процессы с $v = 10$ —50 км/с.

ЭФФЕКТЫ АВАРИЙ, КАТАСТРОФ И ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ ЗАИМ

Аварии на военных складах детально исследованы автором на примере событий возле г. Артемовск (2003 г.) и г. Мелитополь (2004 г.) [3, 4]. На складах в Артемовске хранилось 3.2 кт боеприпасов, прореагировало 1.7 кт, под Мелитополем — соответственно 91.6 и 18 кт. Радиус разлета боеприпасов и осколков в первом случае редко превышал 3—4 км, во втором — достигал 10—11 км. В целом величины эффектов взрывов в течение катастрофы под Мелитополем были примерно в 3—10 раз больше. Пожары были в десятки раз сильнее. Примерно во столько же раз были больше и экологические последствия [3—5].

В течение катастрофы 6—16 мая 2004 г. на складах вблизи г. Мелитополь энерговыделение составило около 20 ТДж. При взрывах разрушено и перемещено около 360 кт вещества. При этом образовано десятки килотонн пыли, в том числе и порядка 0.1—1 кт аэрозолей (часто заряженных), заброшенных на достаточно большие высоты, где время их оседания составляет 1—10 сут. Масса разлетевшихся в зоне радиусом до 10 км останков боеприпасов превышала 10 кт. Взрывы привели к генерации акустического излучения с суммарной энергией около 14 ТДж, его средняя мощность была близка к 0.2—1.4 ГВт. В спектре акустического излучения преобладали составляющие с частотами порядка 1—10 Гц.

Суммарная энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, не превышала 1—2 ГДж. Их средняя мощность составляла десятки — сотни киловатт.

Вблизи очага катастрофы напряженность атмосферного электрического поля должна была на 3—4 порядка превышать ее фоновое значение и составлять 0.1—1 МВ/м. Вариации индукции геомагнитного поля должны были достигать значений в несколько десятков пикотесла. Взрывы боеприпасов сопровождались генерацией электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

Взрывы на складах привели к крупномасштабным интенсивным пожарам. Их горизонтальный и

вертикальный размеры достигали 100 и 300 м соответственно. Массы сгоревших материалов, дыма и сажи составили около 10000, 1000 и 500 т соответственно. Энерговыделение при пожарах и их мощность примерно равнялись 100 ТДж и 5 ГВт.

Пожары вызвали генерацию АГВ со средней мощностью 15 МВт и энергией 300 ГДж. Следовало ожидать усиления излучения вблизи частот 1.9 и 3 мГц, а также в диапазонах частот 0.02—0.2 и 0.01—1 Гц.

Массовые взрывы и пожары нарушили тепловой и динамический режим в системе подстилающая поверхность — атмосфера. Генерация, распространение и диссиляция АГВ активизировали взаимодействие нижней и верхней атмосфер. Существовали и другие каналы воздействия процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу, т. е. на всю систему ЗАИМ.

Важнейший результат исследований заключается в подтверждении установленного ранее автором [2] факта возможности стимуляции вторичных, значительно более энергичных процессов. Они связаны с рассеянием аэрозолями и поглощением сажей солнечного излучения продуктами взрывов и горения, выброшенными в стратосферу, а значит, частичным экранированием земной поверхности. Важно, что коэффициент триггерности в случае описываемой катастрофы составлял 10^3 — 10^4 [3, 4]. В результате экранирования солнечного излучения земная поверхность недополучила за 10 сут около $2 \cdot 10^{18}$ Дж энергии. Примерно такая же энергия выделилась в атмосфере. К счастью, такие нарушения энергетического баланса не имеют катастрофического значения ни для земной поверхности, ни для атмосферы.

Военные действия в Ираке (2003 г.). Результаты исследований [2, 7] показали, что воздействие на атмосферу в ходе современных региональных ядерных войн может быть значительным. Наиболее существенные по энергетике экологические последствия связаны с выбросами мелкой пыли, дыма и сажи, которые частично экранируют солнечное излучение. Энергия вторичных процессов на 3—6 порядков превосходит энергию первичного источника. Несмотря на это, вторичные процессы не приводят к катастрофическим последствиям, если военные действия не принимают затяжного характера.

Возникающие в приземной среде возмущения распространяются на большие (~ 1000 км) расстояния и охватывают не только нижнюю атмосферу, но и среднюю и верхнюю атмосферу, а также ионосферу с магнитосферой, т. е. всю систему ЗАИМ [1, 2].

На примере военных действий в Ираке показано, что мощность и энерговыделение отдельного город-

ского пожара достигали 10 МВт и порядка 1 ТДж. Суммарное энерговыделение было около 400 ТДж при средней мощности, близкой к 4 ГВт. При этом в атмосферу было выброшено около 1 кт дыма и 0.5 кт сажи [2].

Энергия и средняя мощность вторичных процессов, обусловленных частичным экранированием солнечного излучения, составили около 170 ПДж и 1.7 ТВт. Величина акустической энергии, сгенерированной городскими пожарами, достигала 1 ТДж при средней мощности 10 МВт.

Горение нефтяных скважин — самый интенсивный источник возмущения параметров околосземной среды и процессов в ней. Мощность, выделяемая при горении скважины в ходе военных действий в Ираке, составляла десятки ГВт, энерговыделение — десятки ПДж, а высота термика — 3 км. Суммарное количество сгоревшей нефти приблизилось к 40 Мт, энерговыделение — к 1000 ПДж при средней мощности около 1 ТВт. В результате горения нефтяных скважин (около 50 штук) в атмосферу было выброшено почти 4 Мт дыма и 2 Мт сажи. Массы этих выбросов сравнялись или даже преувеличили (для сажи) массы дыма и сажи во всей атмосфере. Это привело к эффекту частичного экранирования солнечного излучения, из-за которого земная поверхность недополучила около 10^{22} Дж энергии солнечного излучения. Средняя мощность этого вторичного (триггерного) процесса составила около 7 ПВт. Горение нефте скважин сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 4.5 ПДж и средней мощностью около 2 ГВт.

При пожарах на нефтехранилищах Ирака сгорело почти 1 Мт нефти, в атмосферу выброшено около 80 кт дыма и 40 кт сажи. Суммарное энерговыделение составило 30 ПДж при средней мощности 100 ГВт. Энергия и мощность вторичных процессов, связанных с экранированием солнечного излучения, составили $4 \cdot 10^{19}$ Дж и 0.1 ПВт. Горение нефтехранилиш сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 100 ТДж и мощностью 0.3 ГВт. При пожарах в частотном спектре АГВ должно было иметь место усиление составляющих на частотах около 0.002, 0.1 и 1 Гц при среднем диаметре пламени 10 м.

В ходе военных действий при лесных пожарах может сгореть до нескольких Мт древесины. В атмосферу при этом будет выброшено сотни кт дыма и сажи. Суммарное энерговыделение от лесных пожаров может достичь десятков ПДж при средней мощности в несколько ТВт.

Кроме нарушения теплового и динамического режимов в системе подстилающая поверхность — атмосфера, к негативным экологическим последствиям приводят выбросы углеводородов (10÷100 % от фонового значения во всей атмосфере) и кислот

HCl , H_2SO_4 и HNO_3 (10 % от фонового значения во всей атмосфере). Такие выбросы следует признать если не катастрофическими, то по крайней мере недопустимыми.

Интенсивные пожары, выбросы наэлектризованной пыли и аэрозолей, инъекция радиоактивного вещества в результате использования боеголовок из слабо обогащенного урана, изменяя проводимость достаточно больших объемов атмосферного газа, должны приводить к существенному возмущению электрических параметров атмосферы над регионом ВД и глобальной электрической цепи в целом.

Значительная энергетика АГВ обуславливает нарушение режима взаимодействия нижней и верхней атмосфер, а также возникновение вторичных процессов. Имеют место и другие каналы воздействия (электрического и электромагнитного типов) процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу, а значит, и на всю систему ЗАЙМ.

ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ КАНАЛЫ ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ

Взаимодействие между подсистемами в системе ЗАЙМ осуществляется при помощи волн различной физической природы (квазистатических полей) и потоков частиц. Так, из литосферы и приземной атмосферы в геокосмос поступает энергия в виде электромагнитного излучения, квазистатических электрических и магнитных полей, АГВ и т. п. В частности, вдоль магнитных силовых линий переносится энергия ионосферных электрических полей и потоки холодной плазмы из ионосферы (в дневное время), вниз устремляются потоки высокоэнергичных частиц и потоки холодной плазмы (в ночное время). Пример расчета плотностей потоков энергии Π_i и Π ионосферного электрического поля E_i и высыпающихся электронов с энергией 10—100 кэВ приведен в [1, 7, 14]. Важно, что Π_i и Π могут быть одного порядка.

Волновые процессы. Перенос возмущений от источников энерговыделения до места наблюдения осуществляется при помощи волн (как линейных, так и нелинейных вблизи от источника) [1, 7, 10, 11, 19]. Разновидностью последних есть ударные волны и солитоны.

Стимулированное высыпание частиц. Автором предложен достаточно универсальный и эффективный механизм высыпания частиц из радиационного пояса, связанный с замедлением электронов в электрическом поле поляризации $PE_p = E_i |\Delta N/N|$, ΔN — возмущение N в Е-области ионосферы с горизонтальным размером L_\perp . При $E_i \approx 3$ мВ/м, $L_\perp \sim 100$ —1000 км и $\Delta N/N \approx 1$ имеем $E_p \approx 3$ мВ/м и

изменение «поперечной» энергии электронов, захваченных в геомагнитную ловушку, $\Delta\varepsilon_{\perp} \approx eE_p L_{\perp} \approx 0.3\text{--}3$ кэВ. Такого уменьшения энергии часто достаточно для стимуляции высыпания электронов. Этот механизм, по-видимому, наблюдался нами при воздействии МР, ЗС, ЗТ, прохождении СТ и т. п. По измеренным значениям N и ΔN для различных событий оценены плотности потока $\Pi_{e,p}$ электронов и протонов. Оказалось, что $\Pi_e \approx 10^7\text{--}10^9$ м $^{-2}\text{s}^{-1}$ [1, 7].

Второй эффективный механизм высыпания электронов связан с генерацией циклотронной неустойчивости. Число n энергичных частиц в силовой трубке и плотность w энергии ОНЧ-волн описывается нелинейными уравнениями, приведенными в [1, 7]. Например, при инжекции ОНЧ-энергии молнии с удельной мощностью $I_w = 0.1\text{--}1$ пВт/м 3 имеем $n \approx 4 \cdot 10^{11}$ м $^{-2}$ и $\Pi_e \approx 2 \cdot 10^{10}\text{--}2 \cdot 10^{11}$ м $^{-2}\text{s}^{-1}$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обосновано, что образование ЗАИМ является сложной открытой динамической нелинейной системой. Сформулированы основные положения системной парадигмы.

2. Показано, что к важнейшим свойствам системы ЗАИМ относится появление триггерных механизмов высвобождения энергии. В ряде случаев коэффициент триггерности может достигать значений $10^5\text{--}10^{10}$.

3. Продемонстрировано, что высокоэнергичные явления (землетрясения, вулканизм, мощные атмосферные процессы, грозы, терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, выбросы корональной массы, геокосмические бури и т.п.) вызывают комплекс процессов в системе ЗАИМ, приводят к перестройке характера взаимодействий подсистем, к накоплению и высвобождению энергии в них.

4. Установлены механизмы и каналы взаимодействия подсистем. Воздействие мощных источников на атмосферу, ионосферу и магнитосферу осуществляется, по крайней мере, по трем каналам: акусто-гравитационному, электромагнитному и электро- и магнитоквазистатическому, с которыми связаны генерация волн и полей соответствующей природы.

Заложены основы построения моделей главных процессов в системах тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ТАИМ) и океан — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ОАИМ).

5. Продемонстрировано, что подсистемы и вся система ЗАИМ в целом являются нелинейными.

6. Взаимодействие между подсистемами в системе ЗАИМ осуществляется при помощи волн раз-

личной физической природы, квазистатических полей, потоков частиц, тепла и т. п. Выявлены или отождествлены типы волн, переносящие возмущения в системе ЗАИМ на значительные и глобальные расстояния. Предложен достаточно универсальный механизм высыпания электронов из радиационного поля. Показано, что высыпание электронов в средних широтах сопровождает большинство нестационарных процессов в системе ЗАИМ. Их потоки — порядка $10^7\text{--}10^9$ м $^{-2}\text{s}^{-1}$.

7. Активные эксперименты оказались весьма эффективными для моделирования процессов в подсистемах и изучения механизмов их взаимодействия. Они показали ограниченность линейного описания реакции подсистем на мощное энерговыделение, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном и локализованном энерговыделении.

8. Крупномасштабные неядерные военные действия, а также аварии и катастрофы на военных складах и базах, являясь разновидностью активных экспериментов, приводят к комплексу эффектов не только на поверхности планеты и в приземной атмосфере, но и в остальных частях атмосферы, в ионосфере и в магнитосфере, т. е. в системе ЗАИМ в целом. Энергетика и экологические последствия соответствующих процессов могут быть значительными.

9. Системная парадигма должна стать основой теории, методом и методологией изучения системы ЗАИМ как сложного открытого диссипативного динамического нелинейного объекта.

1. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
2. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март—апрель 2003 г.) // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С. 13—33.
3. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске // Геофиз. журн.—2004.—26, № 4.—С. 31—44.
4. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь // Геофиз. журн.—2004.—26, № 6.—С. 61.
5. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах — источник экологических катастроф в Украине // Экология и ресурсы.—2004.—№ 10.—С. 55—67.
6. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 16.
7. Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (Часть 1) // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697; Часть 2.—2007.—5, № 4.—С. 225—246.
8. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., et al. Atmospheric-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of May 31,

- 2003, in Kharkov // Geomagnetism and Aeronomy.—2005.—45, N 4.—P. 494—518.
9. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric wave disturbances accompanied by rocket launches against a background of natural transient processes // Geomagnetism and Aeronomy.—2004.—44, N 4.—P. 476—491.
 10. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations // Geomagnetism and Aeronomy.—2006.—46, N 2.—P. 183—198.
 11. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation // Geomagnetism and Aeronomy.—2006.—46, N 2.—P. 199—208.
 12. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. Wave-like processes in the ionospheric f region that accompanied rocket launches from the Baikonur site // Geomagnetism and Aeronomy.—2006.—46, N 6.—P. 742—759.
 13. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U. S. powerful space vehicle launching // Radio Physics and Radio Astronomy.—1998.—3, N 2.—P. 181—190.
 14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Radio Physics and Radio Astronomy.—1998.—3, N 2.—P. 191—197.
 15. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near-earth plasma // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2000.—N 3.—P. 514—516.
 16. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. Radio probing of the perturbations originating in the near-earth plasma from natural and anthropogenic energy sources // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2000.—N 3.—P. 497—500.
 17. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // Int. J. Geomagn. Aeron.—2007.—7, GI3001.—doi:10.1029/2005GI000125.
 18. Garmash, K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., et al. Global ionospheric disturbances caused by a rocket launch against a background of a magnetic storm // Geomagnetism and Aeronomy.—1999.—39, N 1.—P. 69—75.
 19. Grigorenko E. I., Lazorenko S. V., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave disturbances in the ionosphere accompanying the solar flare and the strongest magnetic storm of September 25, 1998 // Geomagnetism and Aeronomy.—2003.—43, N 6.—P. 718—735.
 20. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Specific features of the ionospheric storm of March 20—23, 2003 // Geomagnetism and Aeronomy.—2005.—45, N 6.—P. 745—757.
 21. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., et al. Dynamic processes in the ionosphere during the strongest magnetic storm of May 30—31, 2003 // Geomagnetism and Aeronomy.—2005.—45, N 6.—P. 758—777.
 22. Panasenko S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7—10, 2004 magnetic storm in the lower ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy.—2007.—47, N 5.—P. 608—620.

PHYSICS AND ECOLOGY OF THE EARTH-ATMOSPHERE-IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE SYSTEM

L. F. Chernogor

The Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system is proved to be a complex open dynamical nonlinear system. The basic ideas of the system paradigm are stated. The high-energy phenomena in the system are shown to be a cause of a myriad of, as a rule, nonlinear processes and of the rearrangement in the character of subsystem coupling. Ecological consequences of accidents, catastrophes, and regional wars in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system are discussed.

А. А. Логинов, В. А. Ткаченко, О. К. Черемных

Институт космических исследований НАНУ и НКАУ, Киев.

О гидродинамическом механизме смены фаз динамо-цикла Солнца

Представлено 25.06.07

Запропоновано модель механізму зміни фаз генерації магнітного поля Сонця. Суть механізму згідно запропонованої моделі полягає в наступному. Через втрату стійкості торoidalного диференціального обертання Сонця при досягненні порогового значення залежності кутової швидкості від радіуса та широти $\Omega(r, \theta)$ виникає колоїdalна течія та пов'язаний з нею динамо-процес, який породжує змінне магнітне поле Сонця. Дія на полоїdalну течію сили Коріоліса гальмує диференціальне обертання, наслідком чого буде зміна профілю $\Omega(r, \theta)$ та порушення умови нестійкості. Це призводить в свою чергу до зникнення полоїdalної течії і припинення динамо-процеса. Потім диференціальне обертання відновлюється, динамо-процес поновлюється та при досягненні порогового значення кутової швидкості знову виникає зародження змінного магнітного поля Сонця.

В последнее время достигнут определенный прогресс в понимании механизма генерации магнитного поля Солнца, который принято называть «дynamo»-процессом [12]. Проблема происхождения и поддержания магнитного поля Солнца актуальна для объяснения изменения его полярности и физических процессов, сопровождающих цикл солнечной активности, а также при изучении ряда астрофизических явлений. Впервые она была сформулирована в знаменитой работе Лармора [21].

Значительную роль в развитии теории магнитного динамо и ее приложений сыграла теорема «вморооженности» магнитных силовых линий в движущуюся идеально проводящую среду, сформулированная Альвеном [13]. Эффект вморооженности силовых линий в плазменную среду приводит к тому, что при движении последней магнитное поле может нарастать. Простейшим примером такого процесса является усиление магнитного поля при сжатии проводящего вещества.

Обычно говорят, что первые результаты теории динамо были отрицательными. Так, широкую известность получила теорема Каулинга [7, 14] о невозможности поддержания магнитного поля осесимметричным движением проводящей жидкости и последующие ее обобщения на случай двумерного движения [6], а также других движений с простой симметрией. Сегодня, однако, уже можно говорить о позитивном значении работ этого периода. Именно после их опубликования стало ясно, что движения, способные поддерживать и генерировать магнитные поля, должны быть несимметричными и трехмерными. Кроме того, в этих работах были открыты некоторые эффекты, которые сейчас являются составной частью любой современной теории динамо-процесса, например диамагнитный эффект выталкивания силовых линий магнитного поля из турбулентной проводящей среды [6].

Таким образом, можно сказать, что теория динамо — это теория возбуждения магнитных полей трехмерными несимметричными движениями проводящей среды. Для реализации динамо должна быть нарушена отражательная симметрия движений, простейшей мерой которой служит спиральность [12] (произведение завихренности на скорость). Именно после того, как Паркером [22], Брагинским [1–4] и особенно Штейнбеком, Краузе и Редлером [27] было установлено, что проводящая среда, мелкомасштабные движения которой имеют спиралевидный характер, способна генерировать крупномасштабные магнитные поля, и начался современный этап развития теории динамо.

Приводным механизмом динамо-процесса на Солнце, по нашему мнению, является дифференциальное вращение плазмы, обусловленное неоднородным вращением Солнца, т. е. зависимостью уг-

ловой скорости от широты и от радиуса [8]. Помимо общефизического интереса к его происхождению, изучение неоднородного вращения является актуальным также и с той точки зрения, что оно, по-видимому, играет ключевую роль в формировании магнитной активности Солнца: одиннадцатилетний солнечный цикл, вспышки и пятна на солнечной поверхности и т. д. [25].

В последние годы повышенное внимание к дифференциальному вращению было обусловлено рядом экспериментальных и теоретических достижений. Во-первых, метод доплер-зееановских изображений позволил анализировать движение пятен по поверхности Солнца и определять вращения глубинных слоев Солнца. Во-вторых, развитие гелиосейсмологии [5] позволило по наблюдаемым частотам глобальных колебаний определить распределение угловой скорости не только на поверхности Солнца, но и в его глубине [24, 28]. В-третьих, развитие теории достигло определенной степени завершенности, о чем свидетельствует появление количественных характеристик дифференциального вращения. Можно сказать, что на сегодняшний день теория адекватно описывает внутреннее вращение Солнца и находится в хорошем согласии с данными гелиосейсмологии, а ее предсказания подтверждаются наблюдениями [8].

В настоящее время принято считать, что дифференциальное вращение на Солнце возникает из-за взаимодействия конвективного движения плазменной среды с ее глобальным вращением. Конвективная турбулентность во вращающейся среде испытывает влияние кориолисовых сил, которое модифицирует вращение, делая его неоднородным. Впервые эта идея была высказана в работе А. И. Лебединского [10], в которой было показано, что режим дифференциального вращения на Солнце устанавливается вследствие турбулентного переноса углового момента из внутренних областей наружу. Наличие ненулевых турбулентных потоков углового момента во вращающихся средах называют Л-эффектом [23].

Известно, что в неоднородной вращающейся среде при определенных условиях возникает полоидальное течение [11, 16–18]. На Солнце полоидальное течение направлено от экватора к полюсам вблизи поверхности Солнца и от полюсов к экватору — в глубине конвективной зоны [8]. Полоидальная циркуляция на Солнце подтверждается наблюдениями. В частности, доплеровские измерения свидетельствуют о том, что течение плазмы от экватора к полюсам на солнечной поверхности происходит со средней скоростью порядка 10 м/с [19]. В последнее время данные гелиосейсмологии указывают на наличие глубинного полоидального течения [29].

1. Начальный момент. Вращающаяся как твердое тело плазменная сфера с тороидальной скоростью V_φ (например, для твердотельного вращения $V_\varphi = \Omega\rho$, где $\Omega = \text{const}$ — частота вращения) с вмороженным в нее дипольным магнитным полем B_p^o . В центре сферы находится сферический источник тепла.

2. Λ -эффект. Перенос углового момента турбулентностью во вращающейся плазменной сфере от оси вращения к поверхности. Такой перенос приводит к изменению профиля распределения скорости V_φ по радиусу сферы, увеличивая ее к оси вращения и уменьшая к поверхности сферы. В результате частота вращения Ω перестает быть постоянной и становится функцией радиуса $\Omega = \Omega(\rho)$. Поскольку $d\Omega/d\rho \neq 0$, то возникает режим дифференциального вращения.

3. Ω -эффект. Дифференциально вращающиеся слои высокопроводящей плазмы растягивают вмороженное в них полоидальное магнитное поле B_p^o , что приводит к генерации тороидальной компоненты магнитного поля B_T . Величина последней на несколько порядков больше полоидальной компоненты B_p^o .

4. α -эффект. Конвективная турбулентность, взаимодействует с тороидальной составной магнитного поля B_T , генерирует тороидальный ток $j_T = \alpha B_T$, направленный вдоль B_T .

5. $\alpha - \Omega$ -динамо. Одновременное действие α -эффекта и Ω -эффекта приводит к возникновению переменной компоненты полоидального магнитного поля Солнца.

Рис. 1. Последовательность физических процессов при генерации магнитного поля Солнца

Дифференциальное вращение взаимодействует с постоянно присутствующим на Солнце полоидальным магнитным полем B_p^o , (медленно затухающим реликтовым магнитным полем, захваченным при аккреции Солнца). Вследствие вмороженности B_p^o в высокопроводящую плазму последнее увлекается тороидальным сдвиговым течением и усиливается, генерируя тороидальное магнитное поле B_T (так называемый Ω -эффект [22]). Известно, что спиральное турбулентное течение высокопроводящей

плазмы при наличии тороидального магнитного поля генерирует тороидальный ток $j_T = \alpha B_T$ [12] (так называемый α -эффект, где α — параметр турбулентных пульсаций [26]), который, в свою очередь, является источником переменного полоидального магнитного поля Солнца. Одновременное действие α -эффекта и Ω -эффекта называется $\alpha - \Omega$ -динамо. Схема, поясняющая суть динамопроцесса, приведена на рис. 1.

В весьма запутанной картине наблюдаемых на

Солнце процессов различных пространственно-временных масштабов и их сложном влиянии друг на друга несложно выделить причины и следствия различных явлений во времени. Тем более что процесс, являющийся в данный момент причиной возникновения другого процесса, в последующем может являться причиной изменения динамики первого процесса вплоть до его полного исчезновения. В тоже время одно явление-причина может порождать несколько явлений-следствий. Так, в приведенной выше схеме мелкомасштабная конвективная турбулентность во вращающейся плазме лежит в основе двух глобальных эффектов: Λ -эффекта и α -эффекта. Поэтому становится понятной трудность описания динамики простого процесса, и тем более такого сложного, как динамо-процесс. Обычно в теории солнечных процессов при их описании от возникновения до полного развития или исчезновения говорят об исчерпании причин, породивших эти процессы. Установление связи между наблюдаемыми процессами затрудняет также пороговый характер их проявления, когда достаточно заметное изменение наблюдаемых параметров вдали от их пороговых значений не приводит к качественным изменениям наблюдаемого явления, а вблизи пороговых значений незаметное для наблюдения изменения параметров качественно изменяет наблюдаемый процесс.

К пороговым явлениям относится, в частности, и генерация полоидального течения вследствие потери устойчивости дифференциально вращающейся плазменной сферы. По нашему мнению, приведенную выше общепринятую схему динамо-процесса следует уточнить и расширить, включив в нее явление полоидального течения, наблюдаемое на Солнце. Проанализируем качественно, к чему это может привести. В литературе известен критерий устойчивости неоднородного вращения жидкости — это критерий Тейлора для течения Куэтта [9]. В нашем случае вращение плазменной сферы будет устойчиво, если в любой ее точке выполняется неравенство

$$\mu(\rho) \frac{d\mu(\rho)}{d\rho} > 0,$$

где $\mu = m\rho V_\varphi$ — угловой момент единичной массы m , возрастающий с радиусом ρ . Такой режим вращения можно называть докритическим. Режим течения $d\mu(\rho)/d\rho = 0$ будем называть пороговым или критическим, поскольку условие $d\mu(\rho)/d\rho = 0$ определяет границу устойчивости. Течение, для которого неравенство нарушено, назовем надkritическим.

Численное моделирование, проведенное ранее в [11] для жидкости, заключенной между вращающимися сферами, показало, что в надkritическом

режиме вращения сферического слоя жидкости происходит потеря устойчивости в виде возникновения и быстрого нарастания полоидальной компоненты течения. Эта компонента отсутствует в докритическом и критическом режимах вращения. В гидродинамике этот эффект хорошо известен и, например, имеет место в уже упоминавшемся выше течении Куэтта. Таким образом переход в надkritическом режим вращения в солнечной конвективной зоне приводит к генерации полоидального течения, которое имеет форму «чечевицы»: на дне конвективной зоны оно направлено от полюсов к экватору, а на поверхности — от экватора к полюсам [8] (см. рис. 2). Отметим, что на рис. 2 показано, что направление скорости полоидального течения в плоскости экватора и на оси вращения имеет чисто радиальное направление. Вектор скорости V_p полностью лежит в меридиональной плоскости, и при обходе вдоль замкнутой линии тока совершает поворот на 360° .

На возникшее полоидальное течение действует сила Кориолиса $F_k \sim V_p \times \Omega$ (V_p — полоидальная скорость течения, Ω — частота вращения). Поскольку Ω и V_p лежат в меридиональной плоскости, то сила Кориолиса ей перпендикулярна, и имеет только φ -ю составляющую в сферической системе координат, связанных с Солнцем. Так как вектор скорости полоидального течения изменяет направление при движении вдоль любой линии тока полоидального течения, то сила Кориолиса действует в противоположных направлениях для приповерхностных и глубинных слоев плазмы. Поэтому весь объем плазмы условно делится на две области по отношению к направлению действия силы Кориолиса: объем, где F_k направлена на восток, и объем, где F_k направлена на запад. На рис. 3 эти области обозначены цифрами 1 и 2, соответственно.

На рис. 3 в плоскости экваториального сечения качественно представлено поведение тороидальной скорости и действие кориолисовых сил вне области твердотельного вращения. Заметим, что в экваториальной плоскости, где полоидальное течение строго радиально и направлено изнутри наружу, сила Кориолиса действует только в западном направлении. На полюсах сила Кориолиса отсутствует. Необходимо отметить, что в области 1 скорость V_φ меньше, чем в области 2, что является следствием Λ -эффекта. При этом во всей области полоидального движения имеет место конкуренция Λ -эффекта и силы Кориолиса. В области 1 такая конкуренция приведет к увеличению тороидальной скорости, а в области 2 — к ее уменьшению. Можно сказать, что сила Кориолиса стремится устранить влияние Λ -эффекта, уменьшая угловой момент в глубинных слоях Солнца и увеличивая

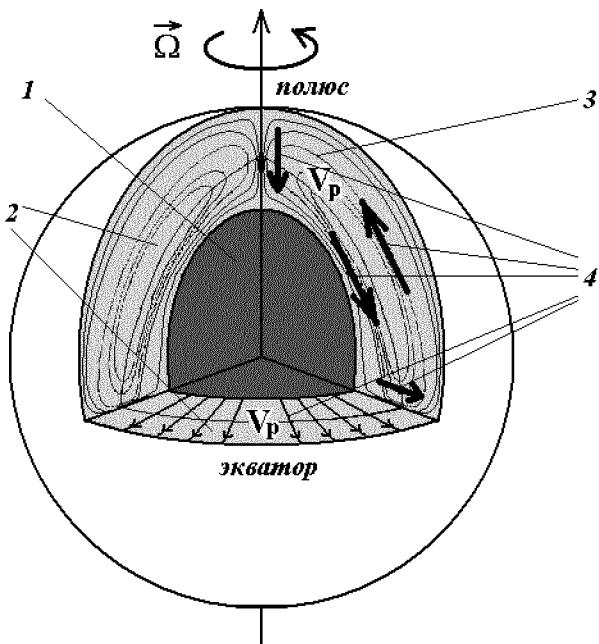


Рис. 2. Полоидальное течение на Солнце: 1 — область твердотельного вращения, 2 — область полоидального течения, 3 — линии тока полоидального течения, 4 — направление скорости V_p полоидального течения

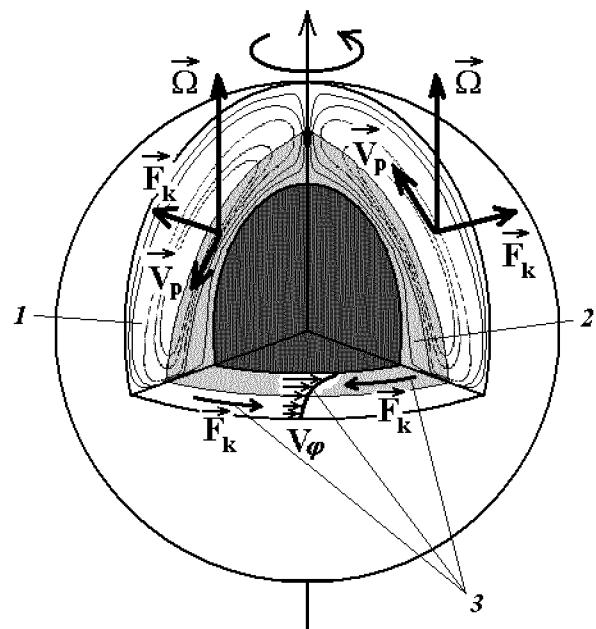


Рис. 3. Схема действия силы Кориолиса F_k на профиль распределения торOIDальной скорости V_φ по радиусу: 1 — часть области полоидального течения, где F_k направлена на восток, 2 — часть области полоидального течения, где F_k направлена на запад, 3 — профиль распределения торOIDальной скорости V_φ по радиусу и воздействующая на него сила Кориолиса F_k

угловой момент вблизи его поверхности. При определенных условиях сила Кориолиса переводит вращение плазмы из надкритического состояния в докритическое. Когда профиль зависимости частоты вращения от радиуса r и широты θ достигнет некоторого порогового значения [11], дифференциальное течение станет устойчивым и, как следствие, полоидальное течение исчезнет, а сила Кориолиса обратится в ноль. Переход вращения плазмы из надкритического состояния в докритическое приводит к срыву генерации торOIDального магнитного поля и его исчезновению, т. е. к прекращению действия Ω -эффекта. Это в свою очередь приведет к исчезновению эффекта $\alpha - \Omega$ -динамо, а вместе с ним — и генерации переменной составляющей полоидального магнитного поля. Затем динамоцикл возобновляется вследствие Λ -эффекта.

Подводя итоги проведенного качественного анализа, отметим, что в основе смены фаз динамо-процесса, по нашему мнению, лежит пороговый механизм потери устойчивости дифференциального вращения солнечной плазмы и генерации полоидальной компоненты глобального течения Солнца.

Остановимся еще на одном чисто гидродинамическом эффекте, вытекающем из проведенного анализа. Как отмечалось выше, действие Λ -эффекта

на некотором первоначальном промежутке времени приводит к переносу углового момента из глубин Солнца к его поверхности, что выражается в постепенном уменьшении торOIDальной скорости V_φ на поверхности. Затем, по прошествии некоторого времени, имеет место переход дифференциального вращения из докритического состояния в надкритическое, что приводит к потери устойчивости торOIDального течения и возникновению полоидального течения на Солнце. Полоидальное течение характеризуется нарастанием величины скорости и одновременным увеличением кориолисовой силы. Действие силы Кориолиса в области 1 приводит к постепенному увеличению торOIDальной скорости V_φ на поверхности вплоть до момента перехода торOIDального течения в устойчивое докритическое состояние. Этот переход сопровождается исчезновением полоидального течения и силы Кориолиса. По этой причине останавливается рост торOIDальной скорости V_φ на поверхности и начинается ее уменьшение вследствие действия Λ -эффекта. Описанный процесс является протяженным во времени и, по-видимому, периодическим. Заметим, что эффект

периодического нарастания и уменьшения скорости вращения поверхности Солнца подтвержден наблюдениями и получил название крутых колебаний Солнца [15, 20]. Поскольку характерный период этих колебаний совпадает с периодом смены полярности магнитного поля Солнца, то можно предположить, что влияние сил Кориолиса на динамо-процесс необходимо учитывать в теории генерации магнитного поля Солнца.

1. Брагинский С. И. Кинематические модели земного магнитного динамо // Геомагн. Аэрон.—1964.—4.—С. 572—583.
2. Брагинский С. И. Магнитогидродинамика земного ядра // Геомагн. Аэрон.—1964.—4.—С. 698—711.
3. Брагинский С. И. Самовозбуждение магнитного поля при движении высокопроводящей жидкости // ЖЭТФ.—1964.—48.—С. 1084.
4. Брагинский С. И. Теория гидромагнитного динамо // ЖЭТФ.—1964.—48.—С. 2178.
5. Воронцов С. В., Жарков В. Н. // Итоги науки и техники. Астрономия.—1988.—Т. 38.—253 с.
6. Зельдович Я. Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей турбулентной жидкости // ЖЭТФ.—1956.—31.—С. 154—146.
7. Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
8. Кичатинов Л. Л. Дифференциальное вращение звезд // Успехи физ. наук.—2005.—175, № 5.—С. 475—494.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.—733 с.
10. Лебединский А. И. Вращение Солнца // Астрон. журн.—1941.—18, № 1.—С. 10—25.
11. Логинов А. А., Самойленко Ю. И., Ткаченко В. А. Возмущение меридионального течения дифференциальным вращением в жидком ядре Земли // Космічна наука и технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 53—68.
12. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. — М.: Мир, 1980.—340 с.
13. Alfven H. On the existence of electromagnetic-hydrodynamic waves // Arkiv. F. Mat. Astron. Fysic.—1942.—29B, N 2.—7 p.
14. Cowling T. G. The magnetic field of sunspots // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1934.—94.—P. 39—48.
15. Howard R. E., LaBonte B. J. The sun is observed to be a torsional oscillator with a period of 11 years // Astrophys. J. Lett.—1980.—239.—P. L33—L36.
16. Kipenhan R. Differential rotation in stars with convective envelopes // Astrophys. J.—1963.—137.—P. 664—678.
17. Kitchatinov L. L., Rudiger G. Differential rotation in solar-type stars: revisiting the Taylor-number puzzle // Astron. and Astrophys.—1995.—299.—P. 446.
18. Kitchatinov L. L., Rudiger G. Differential rotation models for late-type dwarfs and giants // Astron. and Astrophys.—1999.—344.—P. 911—917.
19. Komm R. W., Howard R. E., Harvey J. W. Meridional flow of small photospheric magnetic features // Solar. Phys.—1993.—147, N 2.—P. 207—223.
20. LaBonte B. J., Howard R. Torsional waves on the Sun and the activity cycle // Solar Phys.—1982.—75.—P. 161—178.
21. Larmor I. How could a rotation body such as the Sun become a magnet // Rep. Brit. Assoc. Adv. Sci.—1919.—P. 159—160.
22. Parker E. N. Hydromagnetic dynamo models // Astrophys. J.—1955.—122.—P. 293—314.
23. Rudiger G. Reynolds stresses and differential rotation. I. On recent calculations of zonal fluxes in slowly rotating stars // Geophys. and Astrophys. Fluid Dynamics.—1980.—16, N 1.—P. 239—261.
24. Sehou J., et al. Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the solar oscillations investigation using the Michelson Doppler imager // Astrophys. J.—1998.—505, N 1.—P. 390—417.
25. Sokoloff D. D. The Maunder minimum and the solar dynamo // Solar Phys.—2004.—224.—P. 145—152.
26. Steenbeck M., Krause F. The generation of stellar and planetary magnetic fields by turbulent dynamo action // Z. Naturforsch.—1966.—21a.—P. 1285—1296.
27. Steenbeck M., Krause F., Radler K. A calculation of the mean electromotive force in an electrically conducting fluid in turbulent motion under the influence of Coriolis forces // Z. Naturforsch.—1966.—21a.—P. 369—376.
28. Wilson P. R., Burtonclay D., Li Y. The rotational structure of the region below the solar convection zone // Astrophys. J.—1997.—489.—P. 395—402.
29. Zhao J., Kosovichev A. G. Torsional oscillation, meridional flows, and vorticity inferred in the upper convection zone of the Sun by time-distance helioseismology // Astrophys. J.—2004.—603, N 2.—P. 776—784.

ON HYDRODYNAMIC MECHANISM OF PHASE CHANGE OF THE SUN'S DYNAMO-CYCLE

A. A. Loginov, V. A. Tkachenko, O. K. Cheremnykh

The model of phase change for the Sun's magnetic field generation is proposed. The mechanism of the change is as follows. Due to stability loss of toroidal differential rotation of the Sun at the threshold value of the relationship between the angular velocity and radius and latitude $\Omega(r, \theta)$ poloidal flows arise and the dynamo-process associated with them and generating the Sun's variable magnetic field occurs. Influence of the Coriolis force on the poloidal flows brakes the differential rotation, which causes a change in structure of $\Omega(r, \theta)$ and violation of the instability condition. This results in the disappearance of the poloidal flows and in the interruption of the dynamo-process. Then the differential rotation and dynamo-cycle are regained and when the angular velocity reaches the threshold value the Sun's variable magnetic field is generated again.

УДК 523.985

В. Г. Лозицкий

Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

Магнитные поля в солнечных вспышках

Представлено 25.06.07

Кратко представлены новые наблюдательные данные, полученные спектрально-поляризационным методом. Эти данные подтверждают сделанный ранее автором вывод о том, что в солнечных вспышках могут возникать особо сильные локальные магнитные поля, которые в верхней фотосфере и зоне температурного минимума достигают значений в несколько тесла (~ 10 кГс).

Введение. Солнечные вспышки возникают, как правило, в местах с усложненной и быстро меняющейся структурой магнитного поля, а также в тех участках активных областей, где наблюдаются значительные горизонтальные градиенты магнитного поля. Вопрос о действительной величине локальных магнитных полей в области вспышек в настоящее время неясен. Магнитографические измерения [6] показали, что наиболее яркие узлы H_{α} -эмиссии вспышек возникают вблизи линии инверсии продольного фотосферного магнитного поля ($B_{||} = 0$). Большая часть соответствующих данных получена в линии Fe I 525.02 нм, которая формируется на уровне средней фотосферы, на высоте $h \approx 320$ км [1]. Спектрально-поляризационные наблюдения позволили установить, что даже если яркие узлы вспышки располагаются в области слабых и умеренных продольных полей ($B_{||} < 70$ мТл), в этих местах (в картиинной плоскости) также могут существовать сильные поля (≈ 100 мТл), но на более высоком уровне — в верхней фотосфере и в зоне температурного минимума ($h = 400$ — 500 км) [8]. Полуэмпирические модели вспышек дают двоякую картину высотного распределения магнитного поля: а) с локальными по высоте экстремумами поля [8] и б) с обычным монотонным ослаблением поля с высотой [7]. В первом случае возникают узкие особенности (высотные пики), ширина которых доходит до 100 км. С развитием вспышки эти пики магнитного поля исчезают, а вместо них возникает значительная турбулизация плазмы, соответствующий параметр которой (турбулентная скорость) также распределяется с высотой немонотонно [3].

Во вспышках наблюдались спектральные эффекты, указывающие на еще более сильные поля, величиной 2—9 Тл [4, 5]. Как поля «килогауссово-

го» диапазона, так и «сверхсильные» поля (~ 10 кГс) изменяются в течение вспышки немонотонно: магнитное поле сначала быстро возрастает до определенного уровня, а затем более медленно ослабевает, причем максимум напряженности достигается в максимуме H_{α} -эмиссии [4]. Характерное время соответствующих изменений поля 10—15 мин, а поперечный линейный масштаб тех участков, где отмечены эти эффекты, в среднем 1—2 Мм. Последнее, впрочем, не означает, что действительный размер индивидуальных магнитных структур с такими полями также близок к 1—2 Мм. Поскольку указанные спектральные эффекты довольно слабые (2—4 %), они должны относиться к структурам с весьма небольшим фактором заполнения, 5—10 %. Но тогда действительный масштаб поперечного сечения соответствующих мелкомасштабных элементов должен быть намного меньше 1—2 Мм.

Методические проблемы диагностики таких полей детально обсуждены в работе [5]. Там, в частности, указывается, что для повышения видимости (контраста) зеемановских σ -компонентов, сформированных в участках с такими «сверхсильными» полями, лучше использовать спектральные магниточувствительные линии, имеющие небольшие факторы Ланде ($g \leq 1$). В настоящей работе анализируются новые данные наблюдений в таких линиях, относящиеся к двум недавним вспышкам 23-го цикла солнечной активности.

Новые наблюдательные данные. Ниже изучаются две вспышки: 5 ноября 2004 г. балла M4.1/1B и 14 июля 2005 г. балла X1.2. Вспышки наблюдались автором на эшельном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета им.

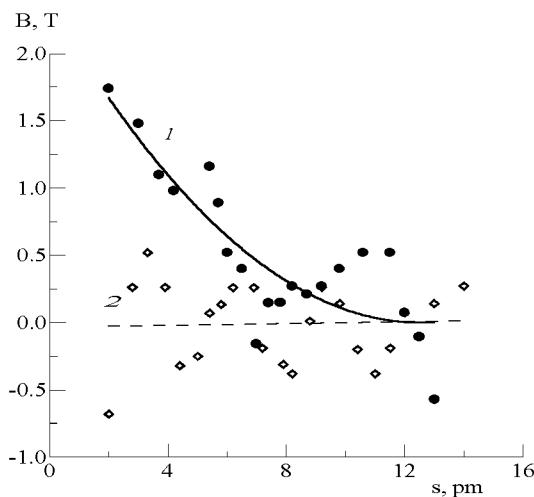


Рис. 1. Сопоставление наблюденного расщепления бисекторов профилей $I \pm V$ в линии Fe I 557.61 нм для вспышки 5 ноября 2004 г. (зависимость 1) и невспышечной области (зависимость 2). По оси абсцисс дано расстояние s от центра линии в пикометрах, по оси ординат — величина магнитного поля B в тесла (Тл)

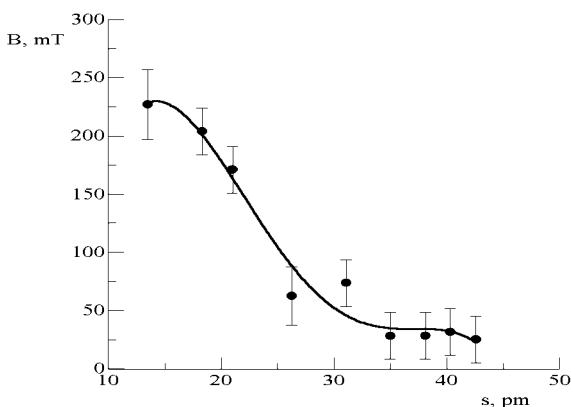


Рис. 2. Зависимость измеренного (по расщеплению бисекторов профилей $I \pm V$) магнитного поля B от расстояния s от центра линии H_{α} во вспышке 14 июля 2005 г. Этот результат соответствует высоте 18 Мм над уровнем фотосферы

Тараса Шевченко [2]. Первая вспышка наблюдалась в активной области AR 10696 вблизи центра диска ($\mu = 0.96$), вторая — в активной области AR 10786 на западном лимбе Солнца.

Вспышка 5 ноября 2004 г. уже исследовалась в работе [3] по 10 спектральным линиям, имеющим факторы Ланде в пределах 0.1—3.0. В настоящей работе дополнительно изучается еще одна линия, Fe I 557.61 нм, имеющая очень низкую магнитную чувствительность, $g = -0.012$. На рис. 1 представлено наблюденное расщепление бисекторов профилей

$I + V$ и $I - V$ в этой линии для двух случаев: вспышки (зависимость 1) и места той же активной области, но за пределами вспышки (зависимость 2).

Из сравнения общего хода зависимостей 1 и 2 видно, что во вспышке в ядре линии Fe I 557.61 существует достоверное магнитное расщепление, величина которого, выраженная в магнитной индукции, достигает 1.5 Тл, т. е. 15000 Гс. Как показало исследование теллурических линий O_2 в области линии Fe I 630.25, в них подобный эффект отсутствует, а это означает, что наблюденное расщепление бисекторов в линии Fe I 557.61 не может быть инструментальным. Согласно расчетам, такой эффект в линии Fe I 557.61 возможен, если имеем двухкомпонентную структуру магнитного поля, состоящую из слабого поля с обычными по ширине спектральными линиями, а также магнитную компоненту с сильным полем, небольшим фактором заполнения и узкими профилями линий. Относительный допплеровский сдвиг профилей обоих компонентов незначительный, менее 0.5 км/с. Наблюданное максимальное расщепление бисекторов профилей $I + V$ и $I - V$ в ядре линии позволяет тогда оценить нижний предел локальной напряженности [5]. В нашем случае он равен, как уже говорилось выше, 1.5 Тл. Вероятная высота появления таких полей во вспышке (учитывая высоту формирования линии Fe I 557.61) — около 400 км, что соответствует области верхней фотосферы.

В лимбовой вспышке 14 июля 2005 г. найдены места на расстоянии 18—20 Мм от лимба, где линия H_{α} расщеплена в ядре на 200—250 мТл (рис. 2).

Заметим, что для нижней короны это также «сверхсильные» поля, учитывая то, что давление плазмы может удерживать здесь поля величиной лишь в несколько десятых миллиесла (т. е. несколько Гс). На других расстояниях от лимба, в частности, в диапазоне высот 12—17 Мм, величина магнитного поля во вспышке не превышала 100 мТл [12]. Таким образом, как в диапазоне фотосферных высот, так и в нижней короне отмеченные сильные поля могут быть весьма локальными по высоте. По-видимому, сильные локальные поля существенно снижают температуру и турбулентную скорость, что проявляется в значительном сужении профилей спектральных линий.

- Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
- Курочка Е. В., Курочка Л. Н., Лозицкий В. Г., Лозицкая Н. И. и др. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия.—1980.—Вып. 22.—С. 48—56.

3. Курочка Є., Осика О., Лозицький В. Магнітні поля та турбулентні швидкості на різних фазах розвитку сонячного спалаху // Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Астрономія.—2006.—Вип. 43.—С. 7—12.
4. Лозицький В. Г. Наблюдения магнитных полей напряженностью в несколько тесла в солнечных вспышках // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 5.—С. 401—414.
5. Лозицький В. Г. Проблема надпотужних магнітних полів в атмосфері Сонця // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 3.—С. 23—32.
6. Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. — М.: Наука, 1988.—224 с.
7. Abramenko V. I., Baranovsky E. A. Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines // Solar Phys.—2004.—220.—P. 81—91.
8. Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Leiko U. M. Magnetic field evolution in a solar flare // Solar Phys.—2000.—191, N 1.—P. 171—183.
9. Statsenko M. M., Lozitsky V. G. Magnetic field measurements in a limb solar flare: observational evidences to small-scale cold features with 2 kG fields // Abstr. of 14th Open Young Scientist's Conf. on Astronomy and Space Phys. — Kyiv: Kyiv Taras Shevchenko Univ, 2007.—P. 55.

MAGNETIC FIELDS IN SOLAR FLARES

V. G. Lozitsky

New observational data obtained with spectral-polarized method are briefly presented. The data confirm the conclusion made earlier by the author that extremely strong magnetic fields may exist in solar flares which reach values of several tesla (~ 10 kG) in the upper photosphere and temperature minimum zone.

УДК 523.982

Н. И. Лозицкая¹, В. М. Малащук², Н. Н. Степанян²¹Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко²Научно-исследовательский институт «Крымская Астрофизическая обсерватория»

Результаты исследования быстрых изменений магнитного поля солнечного пятна по данным одновременных измерений в КАО и КрАО

Представлено 25.06.07

Быстрые осцилляции магнитного поля солнечного пятна изучены на материале визуальных измерений Зееман-эффекта в линиях Fe I 525.02 и Fe I 630.25 в тени наибольшего пятна активной области NOAA 10953. В течение 27 и 28 апреля 2007 г. выполнено около 600 измерений на солнечных телескопах Киевской и Крымской обсерваторий, причем 112 измерений сделаны одновременно с точностью до минуты на обоих инструментах. Обработка временных рядов с помощью вейвлет-, спектрального фурье- и автокорреляционного анализа показала существование периодов в 6—7 мин и 14—16 мин, их амплитуды равны 2 ± 1 сТл и 3 ± 1 сТл соответственно.

ВВЕДЕНИЕ

Первые данные о быстрых изменениях магнитного поля солнечных пятен на 2—7 сТл в час получены при визуальных измерениях величины зееман-эффекта на солнечных телескопах с высоким спектральным разрешением в 1940—1970 гг. [3]. В пользу солнечной природы колебаний свидетельствовали одновременные изменения площади и контраста пятна. Одновременные наблюдения в Пулково и Потсдаме показали сходство временного хода напряженностей одних и тех же пятен. Влия-

ние качества изображения на величину измеренных напряженностей исследовалось в работе [2]. Величина дрожания и качество изображения регистрировались одновременно с измерениями напряженности магнитного поля с дискретностью около 12 мин в течение 9 ч. В большинстве случаев быстрые вариации напряженности не были связаны с этими параметрами. Поэтому в работе [2] сделан вывод, что в основном наблюдены реальные изменения напряженности магнитного поля солнечных пятен, несколько искаженные изменением качества изображения. Во время солнечных вспышек на

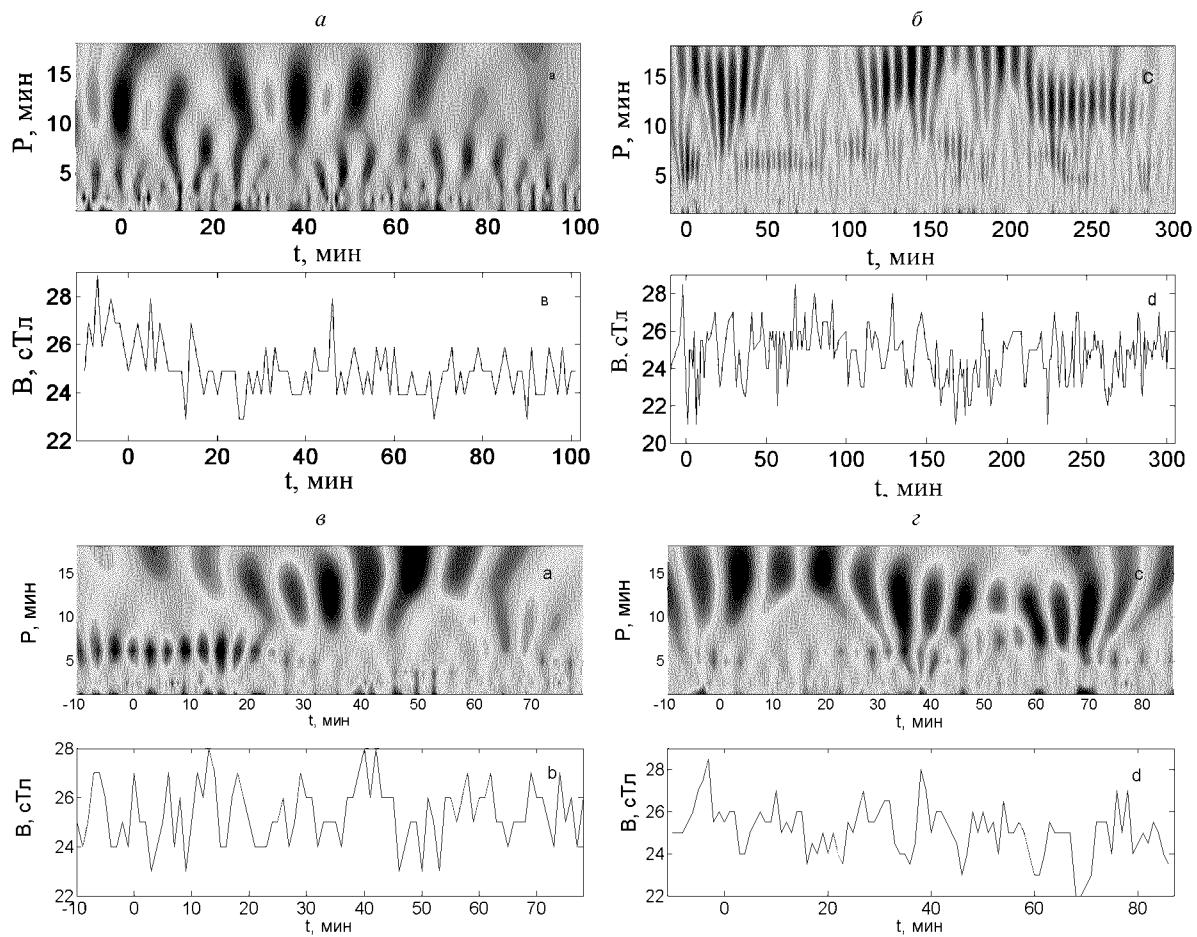


Рис. 1. Ряды измерений магнитного поля солнечного пятна: *a*, *b* — 27 апреля 2007 г. и их вейвлет-анализ по данным КрАО с 7 ч 17 мин до 9 ч 08 мин UT (*a*) и КАО с 9 ч 48 мин до 14 ч 56 мин UT (*b*). Измерения в КАО до 9 ч 47 мин не включены, так как интервал между измерениями в первые часы наблюдений в КАО был в среднем 2 мин; *c*, *d* — 28 апреля 2007 г. по данным КрАО с 6 ч 07 мин до 7 ч 36 мин UT (*c*) и КАО с 7 ч 32 мин до 9 ч 08 мин UT (*d*)

временной шкале в 1 мин фотографически зафиксированы изменения магнитного поля близрасположенного пятна со средней амплитудой 6 сТл [1]. В данной работе мы исследуем осцилляции магнитного поля пятна, не связанные со вспышками.

НАБЛЮДЕНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Визуальные измерения магнитного поля солнечного пятна выполнены в Астрономической обсерватории Киевского национального университета (КАО) и НДИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (КрАО). Средняя величина магнитного поля исследуемого пятна была 25 сТл при стандартном отклонении 1.3 сТл. Хотя характеристики спектрографов КАО и БСТ-2 КрАО, погодные условия и используемые спектральные линии разные, коэффициент

корреляции между одновременно (в пределах 1 мин) измеренными напряженностями оказался равен 0.42, достоверность связи двух рядов превышает 90 %. При временном сдвиге на 1—3 мин коэффициент корреляции не превышает 0.19, связь недостоверна. Это указывает на солнечное происхождение кратковременных вариаций магнитного поля. Пространственное разрешение ограничено величиной дрожания (в дни наблюдений оно было 4—10''). Размер тени пятна был 20'', полутени — 50''. Измерения проводились в центре тени.

На рис. 1 виден квазипериодический характер колебаний магнитного поля пятна. Наиболее заметны 6—7-минутные и 12—15-минутные периоды. Временные участки «пропадания» осцилляций могут быть обусловлены как ухудшением качества изображения и дискретностью измерений (по техническим причинам бывали перерывы в измерени-

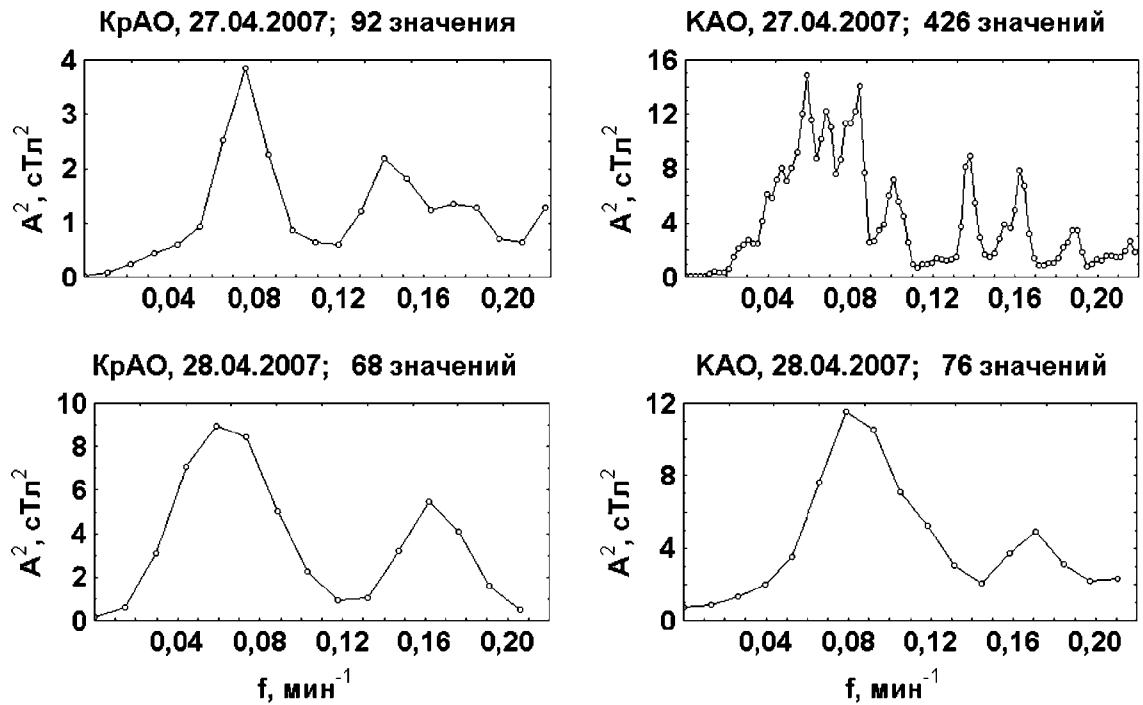


Рис. 2. Спектральный анализ ежеминутных значений магнитного поля солнечного пятна, измеренных в двух обсерваториях

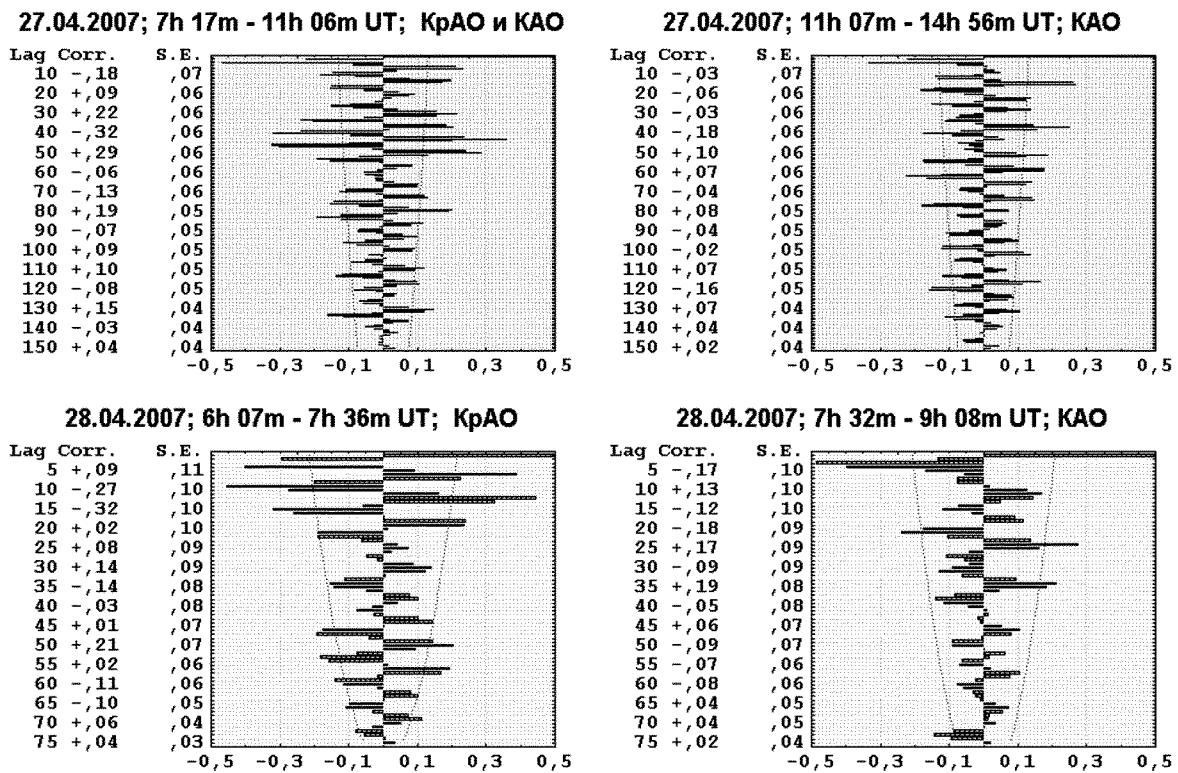


Рис. 3. Автокорреляционные функции преобразованного ряда значений магнитного поля (от исходных значений вычтены 8-минутные бегущие средние)

ях на 1—3 мин), так и реальными процессами в пятне.

Для оценки амплитуд найденных колебаний выполнен фурье-анализ. Окно исследуемых периодов выбрано 4—20 мин вычитанием от исходного ряда 20-минутного бегущего среднего и слаживанием разниц по 3 точкам. По спектрам мощности (рис. 2) найдено, что амплитуда 12—14-минутных колебаний равна примерно 3 сТл, а 6—7-минутных — около 2 сТл. Ошибка определения амплитуды не превышает 1 сТл.

Автокорреляционный анализ рядов измерений во временном окне 2—10 мин, представленный на рис. 3, показал, что период изменяется от 5 до 8 мин, составляя в среднем 6—7 мин, средняя значимость пиков 0.05.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применение различных методик анализа временных рядов, дополняющих друг друга, дают одинаковый результат в отношении периодов колебаний. Осцилляции магнитного поля пятна солнечного происхождения имеют периоды 6—7 и 12—14 мин. Они регистрируются не на всем интервале измерений и найдены при статистической обработке многочасовых рядов частых измерений (в основном ежеминутных) на фоне шумов с диапазоном вариаций в 5—7 сТл, обусловленных как истинными разнопериодными вариациями, так и нестабильностью условий наблюдений.

Характерной чертой найденных колебаний оказалась большая амплитуда, около 2—3 сТл, вдвое превышающая среднее квадратичное отклонение ряда наблюденных значений. Известно, что 5-минутные колебания скорости в тени пятна имеют в несколько раз меньшую амплитуду, чем вне пятен. Эффект изменения прозрачности [4, 5] вследствие этих колебаний при высотном градиенте магнитного поля больших пятен 0.1—0.6 мТл/км мог бы объяснить амплитуды короткопериодических осцилляций только до 1 сТл, скорее всего 0.4—0.5 сТл, как в работе [5].

Наблюденные нами колебания поля обнаружены при весьма посредственном пространственном разрешении. Это возможно при когерентности осцилляций на значительной части тени пятна, что согласуется с данными, приведенными в [5]. В тоже время найденные амплитуды колебаний на по-

рядок превышают приведенные в литературе последних 10 лет [4, 5]. Возможно, причина расхождения не в различной технике измерений, а в длительности наблюдений. Если колебания происходят «щугами», на что указывают вейвлет-диаграммы и некоторые автокорреляционные функции, для их регистрации необходим достаточно длительный интервал (2—3 ч) наблюдений вектора магнитного поля значительной части ядра крупного пятна. При всесторонней статистической обработке многочасовых рядов ежеминутных измерений положительно решается вопрос о реальности мощных короткопериодических осцилляций.

Авторы благодарны В. Г. Лозицкому за проведение значительной части наблюдений и А. В. Грицаю за программу для вейвлет-анализа наших наблюдений.

1. Бабин А. Н., Коваль А. Н. Быстрые изменения магнитных полей пятен во время вспышек // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2003.—99.—С. 89—91.
2. Вяльшин Г. Ф., Юдина И. Ф. К вопросу об измерении максимальных напряженностей магнитных полей солнечных пятен при исследовании их быстрых изменений // Солн. данные.—1982.—№ 5.—С. 97—101.
3. Чистяков В. Ф. Колебания магнитных полей солнечных пятен и их связь с явлениями в активной области // Солн. данные.—1977.—№ 10.—С. 93—98.
4. Khomenko E. V., Collados M., Bellot Rubio L. R. Magnetoacoustic waves in sunspots // Astrophys. J.—2003.—588.—Р. 606—619.
5. Settele A., Sigwarth M., Muglach K. Temporal and spatial variations of the magnetic field vector in sunspots // Astron. and Astrophys.—2002.—392.—Р. 1095—1104.

RESULTS OF THE INVESTIGATION OF FAST MAGNETIC FIELD OSCILLATIONS IN A SUNSPOT ON THE BASIS OF SIMULTANEOUS MEASUREMENTS IN THE KYIV AND CRIMEA OBSERVATORIES

N. I. Lozitska, V. M. Malashchuk, N. N. Stepanyan

Fast oscillations of sunspot magnetic fields were studied using visual measurements of the Zeeman splitting in the Fe I 525.02 and Fe I 630.25 lines observed in umbra of the largest sunspot of the active region NOAA 10953. During 27—28 April 2007, about 600 measurements were carried out with solar telescopes of the Kyiv and Crimea observatories including 112 quasi-simultaneous measurements (with a time gap less than 1 min). Reducing the observational data with the use of wavelet, Fourier and autocorrelation analysis showed the existence of 6—7 min and 14—16 min oscillations; their amplitudes were 2 ± 1 cT and 3 ± 1 cT, respectively.

УДК 523.947, 523.755+525.7

В. В. Токий¹, В. М. Ефименко², Н. В. Токий¹¹Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, Донецк, ntv1976@mail.ru²Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»

Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, efim@observ.univ.kiev.ua

Возмущения, вызванные горизонтальными приливными силами в экваториальной плоскости солнечной короны

Представлено 25.06.07

Розглянуто вплив гравітаційного збурення, викликаного рухом планет і обертання Сонця, на зміни складових загального магнітного поля корони в рамках моделі Вебера і Девіса. Використано стаціонарну модель сонячного вітру в екваторіальній площині, яка враховує ефекти градієнтів тиску, тяжіння і магнітних сил для радіальних і для азимутальних рухів. В'язкість не враховувалась, а електрична провідність вважалась нескінченною. Досліджено періодичні півдобові розв'язки з урахуванням гравітаційних і магнітних полів для збурень, викликаних планетами. Отримано аналітичні залежності збурень радіальної і азимутальної складових магнітного поля в екваторіальній площині сонячної корони від часу, відстані до центра Сонця, геліографічної довготи, швидкості сонячного вітру і характеристик планети.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение влияния планет на циклы солнечной активности потребовало вычисления приливной силы [1] и определения высот приливов на Солнце [2]. Полученные результаты не вдохновляли на продолжение этих исследований, так как добавка к гравитационной силе за счет всех приливных сил, обусловленных всеми планетами, не превышала $5 \cdot 10^{-10}$ % от силы притяжения Солнца, а предсказываемая высота прилива не составляла и $3 \cdot 10^{-10}$ % от радиуса Солнца a , что соответствует приливам порядка миллиметров. При этом не учитывалось, что в отличие от океанов на Земле солнечная корона является плазмой. В работе [3] описано влияние гравитационного возмущения на изменения параметров плазменного слоя при действии горизонтальных приливных сил, нарушающих сферическую симметричность и стационарность, но без учета магнитных полей. Первой моделью коронального расширения, в которой учитывалась магнитная сила, была одножидкостная политропная модель, сформулированная Вебером и Дэвисом [4]. В их работе магнитное поле у основания короны считалось монопольным. Такое задание поля не адекватно реальности, но лишь оно совместимо с точными решениями для сферически-симметричного стационарного расширения короны [5]. Поэтому цель настоящей работы состояла в том, чтобы

описать влияние гравитационного возмущения, обусловленного движением планет и вращением Солнца, на изменения компонентов общего электромагнитного поля короны и скорости солнечного ветра в рамках модели Вебера и Дэвиса.

МОДЕЛЬ ВЕБЕРА — ДЭВИСА ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО РАСШИРЕНИЯ

В невозмущенной приливными силами задаче рассматривалось взаимодействие между идеально проводящим солнечным ветром и магнитным полем. Предполагалось, что компоненты вектора магнитного поля и скорости плазмы в сферической системе координат в экваториальной плоскости имеют радиальную и азимутальную составляющие и зависят только от расстояния до центра Солнца. Топология решений [4] для радиальной составляющей уравнения движения показала, что решение для солнечного ветра и должно непрерывно проходить через три критические точки. После паркеровской критической точки, связанной со скоростью звука

$$u_c = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

на расстоянии $r_c = \frac{GM}{4kT}$, радиальная составляющая солнечного ветра и должна достигнуть альве-

новской скорости

$$u_f = \sqrt{\frac{B_r^2 + B_\varphi^2}{\mu\rho}},$$

а перед ней на альвеновском радиусе r_A — радиальной альвеновской скорости

$$u_A = \sqrt{\frac{B_r^2}{\mu\rho}}.$$

Здесь G — гравитационная постоянная, M — масса Солнца, k — константа Больцмана, T — температура, $\rho = mn$ — плотность, m — масса протона, n — концентрация.

В этом случае из уравнения $\operatorname{div}\bar{B} = 0$ следует, что радиальная составная магнитного поля падает с расстоянием по квадратичному закону

$$B_r = B_0 \frac{a^2}{r^2},$$

где B_0 — напряженность поля на поверхности Солнца ($r = a$).

Азимутальная составляющая магнитного поля определяется выражением

$$B_\varphi = -B_r \Omega \cdot r \frac{r_A^2 - r^2}{u_A r_A^2 - u r^2}.$$

Азимутальная составляющая солнечного ветра равна

$$V_\varphi = \Omega \cdot r \frac{r_A^2(u_A - u)}{u_A r_A^2 - u r^2}.$$

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ

Настоящая работа основана на простейших предположениях. Будем рассматривать тонкий изотермический слой идеально проводящей среды в экваториальной плоскости солнечной короны толщиной h на расстоянии r от центра Солнца ($h \ll r$).

Пусть Ω — угловая скорость вращения Солнца, t — время, e — заряд электрона, φ — гелиографическая долгота, θ — дополнение к гелиографической широте точки, δ_j — гелиоцентрическое склонение j -й планеты, δu , δV_φ — компоненты скорости частиц, δE_θ — меридиональная составная электрического поля, δg_φ — азимутальная составная горизонтального приливного ускорения.

Принимаем, что при действии горизонтальных приливных сил изменения концентрации δn и скорости δu , δV_φ частиц будут малыми. Для определения изменений в рамках изотермического приближения мы воспользуемся линейной системой гидродинамических уравнений, включая уравнение непрерывности, движения, и уравнений Максвелла.

Из закона Ома для идеально проводящей среды получим выражение

$$\delta E_\theta = -\delta u B_\varphi - \delta B_\varphi u + \delta V_\varphi B_r + \delta B_r V_\varphi; \quad (1)$$

из радиальной составляющей уравнения индукции —

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \delta B_r}{\partial t} - \frac{B_r}{r} \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{B_\varphi}{r} \frac{\partial \delta u}{\partial \varphi} + \\ & + \frac{u}{r} \frac{\partial \delta B_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \delta B_r}{\partial \varphi} = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

из азимутальной составляющей уравнения индукции —

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \delta B_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} \delta B_r - \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} \delta B_\varphi + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial(rB_r)}{\partial r} \delta V_\varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial(rB_\varphi)}{\partial r} \delta u = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнения $\operatorname{div}(\bar{B} + \delta \bar{B}) = 0$ следует, что

$$2\delta B_r + \frac{\partial \delta B_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (4)$$

Уравнение непрерывности записывается в виде

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \delta n}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 u)}{\partial r} \delta n + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 n)}{\partial r} \delta u + \\ & + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \delta n}{\partial \varphi} + \frac{n}{r} \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Азимутальная составляющая уравнения движения равна

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial t} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} \delta u + \frac{u}{r} \delta V_\varphi + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial r} \right] + \\ & + \frac{2kT}{r\rho} \frac{\partial \delta n}{\partial \varphi} + \frac{B_r}{\mu r\rho} \frac{\partial \delta B_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{\mu r\rho} \frac{\partial(rB_\varphi)}{\partial r} \delta B_r - \\ & - \frac{B_r}{\mu r\rho} \delta B_\varphi = \delta g_\varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

В системе уравнений (1)–(6) введены обозначения

$$\delta g_\varphi = \frac{3G}{2} \frac{M_j}{R_{SJ}^3} r [\cos^2 \delta_j \sin [2(\Omega t - \varphi)]], \quad (7)$$

полученные из горизонтальной приливной силы [1]

$$\delta F_h = \frac{3}{2} G m M_j \frac{r}{R_{SJ}^3} \sin 2\alpha_j, \quad (8)$$

где M_j — масса j -й планеты, R_{SJ} — расстояние от центра Солнца до j -й планеты, α — угол между R_{SJ} и r . За начальный момент времени принят момент прохождения круга склонений планеты через Кэррингтоновский меридиан. Уравнения (1)–(6) настолько просты, что они могут быть проинтегрированы аналитически.

Амплитуды полусуточных изменений меридионального электрического поля и солнечного ветра в экваториальной плоскости солнечной короны, вызванные планетами на расстоянии критического радиуса Альвенена r_A

Планета	Масса	Расстояние	δE_θ , нВ/км		$\frac{\delta u_{\max} - \delta u_{\min}}{u_f - u_A} _{r=r_A}, \%$
			Без учета магнитного поля	С учетом магнитного поля $B_0 = 1$ Гс	
Меркурий	0.0556	0.3871	0.012	36	0.001976
Венера	0.8172	0.7233	0.028	80	0.004453
Земля	1.000	1.0000	0.013	37	0.002062
Марс	0.108	1.5237	0.0004	1	0.00006294
Юпитер	318.4	5.2024	0.029	84	0.004662
Сатурн	95.22	9.5728	0.001	4	0.0002238
Уран	14.58	19.135	0.00003	0.08	0.00000429
Нептун	17.264	29.968	0.000008	0.00002	0.000001323
Плутон	0.92	39.265	0.0000002	0.0006	0.00000003133
Σ_j			0.085	242	0.013

ПОЛУСУТОЧНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Получены аналитические зависимости установившихся полусуточных возмущений радиальных и азимутальных компонентов магнитного поля и солнечного ветра, а также меридионального компонента электрического поля в экваториальной плоскости солнечной короны от времени, расстояния до центра Солнца, гелиографической долготы, концентрации плазмы, скорости солнечного ветра и характеристик j -й планеты (массы, расстояния до Солнца и гелиоцентрического склонения). На расстоянии альвеновского радиуса, в пренебрежении небольшим сдвигом по фазе, они равны:

для радиального и азимутального компонентов магнитного поля

$$\delta B_{rj} = - \frac{GM r_A^2 \Omega \cdot r_c}{4R_{sj}^3 u_c^3} B_r \cos^2 \delta_j \sin [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (9)$$

$$\delta B_{\varphi j} = - \frac{GM r_A^2}{6R_{sj}^3 u_c^2} B_\varphi \cos^2 \delta_j \cos [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (10)$$

для радиального и азимутального компонентов солнечного ветра

$$\delta u_j = \frac{9GM r_A^2}{2R_{sj}^3 u_c^2} u_A \cos^2 \delta_j \cos [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (11)$$

$$\delta V_{\varphi j} = - \frac{5GM r_A^2}{12R_{sj}^3 u_c^2} V_\varphi \cos^2 \delta_j \cos [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (12)$$

для меридионального компонента электрического поля

$$\delta E_{\theta j} = - \frac{GM r_A^3 \Omega^2 r_c}{6R_{sj}^3 u_c^3} B_r \cos^2 \delta_j \sin [2(\Omega \cdot t - \varphi)]. \quad (13)$$

В таблице приведены относительные значения масс, средних расстояний от Солнца, относительно

Земли, максимальные склонения планет и амплитуды (нВ/км) полусуточных установившихся колебаний меридионального компонента электрического поля, вызванных планетами. Они рассчитаны по формуле (20) из работы [3] без учета магнитного поля в экваториальной плоскости солнечной короны на расстоянии альвеновского радиуса r_A . В соседней графе приведены те же амплитуды, рассчитанные по формуле (13) из настоящей работы, где для иллюстративных вычислений принималось $r_A = 20a$, $r_C = 1.7 \cdot 10^9$ м, $u_C = 200$ км/с. Сравнение показывает, что учет общего магнитного поля усиливает амплитуду приливных возмущений на несколько порядков (примерно в 3000 раз) по сравнению с результатами работы [3], в которых не учитывалось общее магнитное поле Солнца.

В последней графе приведено отношение разности максимальной и минимальной полусуточной радиальной скорости солнечного ветра к разности полной альвеновской скорости и радиальной Альвеновской скорости. Сравнение показывает, что в отличие от результатов [1, 2] возмущения радиальной скорости солнечного ветра, обусловленные приливными силами, на расстояниях, близких к альвеновскому радиусу r_A , могут дать заметный вклад в возникновение описанных Вебером и Дэвисом [4] «быстрых» и «медленных» волн направленных как обратно к поверхности Солнца, так и вовне.

ВЫВОДЫ

В рамках изотермического приближения модели Вебера и Дэвиса получена линеаризованная по возмущениям, вызванным горизонтальными приливными силами, система уравнений, включающая уравнения: непрерывности, движения и Максвелла.

Исследованы периодические полусуточные аналитические решения, принимающие во внимание и гравитационные, и магнитные поля, для возмущений параметров электромагнитного поля и скорости солнечного ветра, вызванных планетами.

Численные оценки показывают, что учет общего магнитного поля усиливает амплитуду приливных возмущений меридионального электрического поля на несколько порядков (примерно в 3000 раз) по сравнению с решениями, в которых не учитывалось общее магнитное поле Солнца.

Возмущения радиальной скорости солнечного ветра, обусловленные приливными силами, на расстояниях, близких к альвеновскому радиусу r_A , могут дать заметный вклад в волновые магнитогидродинамические процессы солнечной короны.

Для приближения нашей модели к реальности необходимо учесть вязкость, дипольный характер магнитного поля, нелинейные эффекты, другие ионы, инерциальные свойства электронов, что потребует увеличения количества дифференциальных уравнений и, в частности, замены условия электрической квазинейтральности плазмы уравнениями Максвелла.

1. Токий В. В., Ефименко В. М., Токий Н. В. Электрические поля, вызванные горизонтальными приливными силами в плазменных слоях атмосфер планет и звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2006.—103.—С. 51—59.

2. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976.—302 с.
3. Takahashi Kozo. On the relation between the solar activity cycle and the solar tidal force induced by the planets // Solar Phys.—1968.—3.—P. 598—602.
4. Trellis M. Michel. Marees solaires d'origine planetaire // C. R. Acad. Sc. Paris.—1966.—262.—P. B221—B224.
5. Weber E. J., Davis L. The angular momentum of the solar wind // Astrophys. J.—1967.—148.—P. 217—227.

DISTURBANCES CAUSED BY HORIZONTAL TIDAL FORCES IN THE EQUATORIAL PLANE OF THE SOLAR CORONA

V. V. Tokiy, V. M. Efimenko, N. V. Tokiy

The influence of the gravitational disturbance caused by motions of planets and the Sun's rotation, on the changes in the components of the general magnetic field of the solar corona within the framework of the Weber and Davis model is considered. The steady-state model of the solar-wind flow in the equatorial plane including the effects of pressure gradients, gravitation, and magnetic forces is used for both the radial and azimuthal motions. The viscosity was taken to be zero and the electrical conductivity was put to be infinite. With allowance made for gravitational and magnetic fields the periodic semidiurnal decisions for the disturbances caused by the planets are investigated. We deduced analytical relationships between indignations for radial and azimuthal components of the magnetic field in the equatorial plane of the solar corona and time, distance to the Sun's centre, heliographic longitude, solar wind speed and some characteristics of a planet.

УДК 523.98

А. Н. Кришталь, С. В. Герасименко, А. Д. Войцеховская

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Мелкомасштабные неустойчивости в предвспышечной плазме петель в активной области на Солнце

Представлено 25.06.07

Досліджуються фізичні умови виникнення і розвитку різних типів плазмових нестійкостей в петлях на початковій стадії спалахового процесу. Головною причиною нестійкості є сукупна дія трьох факторів: наявність в петлі великомасштабного квазістатичного електричного поля, врахування впливу парних кулонівських зіткнень і неоднорідностей температури і густини плазми. В якості моделі спалаху використовується модель взаємодіючих магнітних потоків Хейвартса — Пріста — Раста і модель струмонасущого еквівалентного контура петлі Степанова — Зайцева. Спалаховий процес розпочинається з появи першої нестійкості, що має найнижчий поріг збудження, а його початкова стадія закінчується з появою в плазмі аномального опору і виникненням струмових шарів. Показано, що адіабатично повільному зростанню амплітуди субдрейсеровського електричного поля в петлі відповідає певна послідовність появи на різних ділянках струмового контура певного типу нестійкостей. Отримані результати можна розглядати як необхідну умову короткострокового прогнозу спалаху в петельній структурі.

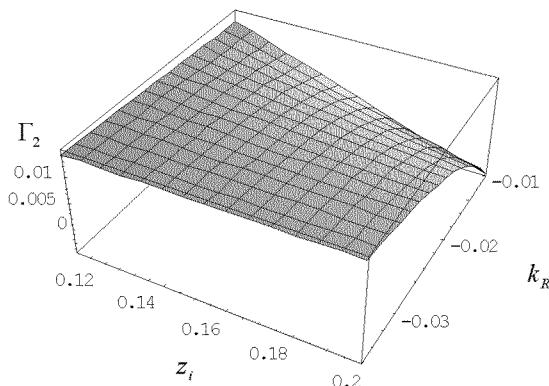
Исследование устойчивости мелкомасштабных возмущений в плазме атмосферы активной области на начальном этапе вспышечного процесса является необходимым условием для решения трех важнейших задач солнечной физики.

1. Изучение турбулентных явлений в атмосфере активной области, прежде всего условий возникновения и динамики развития токовых слоев. Для решения этой задачи следует проанализировать все возможные механизмы неустойчивостей плазмы, т. е. нарастания малых ее возмущений, классифицировать эти неустойчивости, а затем исследовать возможные нелинейные механизмы либо ограничения этих неустойчивостей, либо их развития в турбулентные процессы.

2. Исследование источников и условий генерации различных типов волн в солнечной плазме. Наибольший интерес в этом случае представляют неустойчивости с высокой добротностью, чтобы процесс развития возмущения во времени можно было достаточно надежно идентифицировать как волновой [3]. Подобные процессы могут играть решающую роль в таких явлениях, как распады и слияния волн, а также диссиляция энергии (нагрев) в плазме петель, где требование мелкомасштабности неустойчивости эквивалентно условию малости длины волны возмущения по сравнению с наимень-

шим характерным размером петли. В качестве такового при учете дрейфовых движений чаще всего выступает толщина ее поверхностного слоя.

3. Краткосрочный прогноз вспышки в активной области (АО). При этом исследование устойчивости может иметь отношение только к так называемым «казуальным» краткосрочным прогнозам, поскольку они основаны на предположении о наличии определенного объема знаний о причинах вспышки, ее механизме и стадиях ее развития. Этим «казуальные» прогнозы сильно отличаются от «синоптических», основанных на определенной морфологии, т. е. фактически внешнем виде АО перед вспышкой. Кроме того, необходимо отметить, что исследование линейной стадии развития неустойчивости реально может позволить получить только необходимые условия краткосрочного прогноза. В значительной степени это есть следствие используемой концепции исследований [4—9]. Основные положения концепции таковы: а) при исследовании мелкомасштабных волновых возмущений необходимо установить пространственно-временные границы исследуемой области и рассматриваемого процесса. Объектом исследований является отдельно стоящая вспышечная петля в аркаде, причем не весь ее токонесущий контур, а только та его часть, которая соответствует субфотосферным и хромосферным



Инкремент «обратной модифицированной КАВ» $\Gamma_2 = \Gamma_2(z_i, k_r)$ при $\nabla = -3$, $t_{bound} = 4$ и $(\varepsilon_R)_{bound} = 1.01 \cdot 10^{-4}$

слоем ($500 \leq h \leq 1500$ км). В этой области магнитное поле петли B_0 можно считать почти потенциальным, а субдрейсеровское электрическое поле E_0 — параллельным магнитному. Временные границы определяются продолжительностью начального этапа вспышечного процесса, когда плотность числа высокоэнергичных частиц, захваченных магнитным полем петли после предыдущей вспышки [2, 7, 9] становится исчезающе малой, и влиянием пучков этих частиц на рассматриваемые неустойчивости можно пренебречь [8]. Исследуемый этап берет начало в момент возникновения первой неустойчивости с самым низким порогом возбуждения и заканчивается с возникновением в плазме аномального сопротивления и появлением токовых слоев; б) мелкомасштабные волновые возмущения генерируются вследствие возникновения и развития неустойчивостей на линейной стадии роста возмущения. Длительность стадии определяется величиной инкремента. Причиной неустойчивости является совокупное действие эффектов, связанных с наличием в петлях крупномасштабных электрического и магнитного полей, учетом влияния столкновений заряженных частиц, а также неоднородностей температуры и плотности плазмы; в) при исследовании генерации мелкомасштабных волн в петлях необходимо использовать (прямым или косвенным образом) определенную модель вспышки. В предлагаемой концепции в качестве таковых выступает модель взаимодействующих магнитных потоков Хейвартса — Присты — Раста [2, 3], модель эквивалентного токового контура петли Степанова — Зайцева [3] и модель «арочной неустойчивости» Спайсера [10]; г) медленное по сравнению со временем развития неустойчивости изменение амплитуд магнитного электрического

полей, слабость субдрейсеровского поля и влияние столкновений, а также малость пространственных градиентов плотности и температуры плазмы позволяют реализоваться стационарному сценарию развития неустойчивости, когда равновесные функции распределения электронов и ионов не зависят явным образом от времени; д) при исследовании мелкомасштабных неустойчивостей необходимо учитывать стратификацию плазмы с высотой над уровнем фотосферы. Это означает использование определенного «уравнения состояния» плазмы из определенной полуэмпирической модели атмосферы АО [11]. Наиболее важной количественной характеристикой процесса является амплитуда квазистатического электрического поля E_0 , выраженного в единицах поля Дрейсера E_D . Максимальное значение этой амплитуды $\varepsilon_R = \{E_0/E_D\}$ определяется максимально возможным допустимым процентом «бегающих» электронов. Предложенная концепция позволяет исследовать устойчивость плазменных колебаний при скоростях движения электронов относительно ионов, намного меньших электронной тепловой скорости. Эта стадия развития вспышечного процесса ранее не исследовалась. Она предшествует стадии «предвспышечного подогрева» плазмы в теории Хейвартса — Присты — Раста [2.3]. В рамках предложенной концепции было показано, что в самом начале взаимодействия потоков, когда в плазме доминируют «электронные» столкновения, возникшие неустойчивости генерируют сначала (т. е. по мере возрастания ε_R) кинетические альфеновские и кинетические ионно-звуковые волны на хромосферном участке контура [4], а затем — вторую электронную бернштейновскую гармонику и верхнегибридную волну, — уже на субфотосферном участке токового контура петли [5, 6].

На рисунке представлена поверхность приведенного инкремента $\Gamma_2 = \Gamma_2(z_i, k_r)$ как функция ионного параметра кинетичности $z_i = k_\perp^2 \rho_i^2$ и угла $k_r \equiv k_z/k_\perp$ между направлением распространения волны и магнитным полем $B_0 \parallel OZ$. Здесь k_z и k_\perp — продольная и поперечная составляющие волнового вектора возмущения, ρ_i — ионный циклотронный радиус, $t \equiv T_e/T_i$ — степень неизотермичности плазмы, а ∇ есть отношение характерных масштабов неоднородностей плотности и температуры в плазме. Индекс «гр» обозначает граничные (пороговые) значения величин, а отрицательные значения k_r свидетельствуют о наличии у кинетической альфеновской волны (КАВ) составляющей, направленной в сторону фотосферы. Из рисунка хорошо видно, что инкремент Γ_2 «обратной модифицированной КАВ» имеет четко выраженный порог, — он становится из отрицательного положительным при

$t = t_{\text{rp}}$, $\varepsilon_R = (\varepsilon_R)_{\text{rp}}$ для $z_i > 0.182$ и $k_R < -0.016$ [4]. Данное волновое возмущение обладает высокой добротностью и, согласно «уравнению состояния» F1 MAVN [11], может возникнуть и развиться в петле на высоте $h = 1459$ км при плотности $n_e = 6.89 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температуре $T_e = 4.47 \cdot 10^5 \text{ К}$ и амплитуде магнитного поля $|\mathbf{B}_0| = 31.3 \text{ Гс}$. В работе [1] на основании анализа временных профилей SXR-излучения двухленточной вспышки 7 октября 1979 г. было установлено, что импульсной фазе предшествует фаза предварительного нагрева. Характер развития вспышки соответствовал сценарию для третьего типа магнитных пересоединений, который предусматривает образование токового слоя на низких высотах в атмосфере Солнца. Было зафиксировано наличие неоднородностей температуры и давления плазмы, перемещавшихся в сторону фотосферы. В отдельных случаях движения имели квазипериодический характер. Здесь следует отметить, что удаленному наблюдателю определить вид плазменной волны в теле петли не представляется возможным, даже учитывая возросший уровень точности наблюдений [2, 3].

Исследования, проведенные в рамках предложенной концепции, показали, что генерация первой квазибернштейновской гармоники на верхнегибридной частоте может считаться своего рода сигналом о возникновении в плазме аномального сопротивления и переходе от «периода электронных столкновений» к «периоду бернштейновской турбулентности». И уже только на фоне этой турбулентности генерируются ионно-звуковые и ленгмюровские волны на все том же субфотосферном участке токового контура петли. Возникновение в определенной последовательности различных типов плазменных неустойчивостей на определенных высотах в атмосфере АО можно рассматривать как необходимое условие краткосрочного прогноза вспышки в аркаде.

1. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н. Возмущение фотосферы в процессе развития солнечной двухленточной вспышки // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 3.—С. 163—172.
2. Алтынцев А. Т., Банин В. Г., Кукин Г. В., Томозов В. М. Солнечные вспышки. — М.: Наука, 1982.—247 с.

3. Зайцев В. В., Степанов А. П., Цап Ю. Т. Некоторые проблемы физики солнечных и звездных вспышек // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 6.—С. 3—31.
4. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Генерация кинетических альвеновских волн в плазме петель в активной области // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 4.—С. 81—91.
5. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Генерация верхнегибридных волн в плазме арочных структур Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—21, № 4.—С. 243—256.
6. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. О последовательности появления неустойчивостей плазменных волн в основаниях арочных структур на Солнце на ранних этапах вспышечного процесса // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—21, № 5.—С. 352—367.
7. Kryshtal A. N., Gerasimenko S. V. Slow magnetoacoustic-like waves in post-flare loops // Astron. and Astrophys.—2004.—420.—P. 1107—1115.
8. Kryshtal A. N., Gerasimenko S. V. Kinetic Alfvén waves in preflare plasma // Astron. Nachr.—2005.—326, N 1.—P. 52—60.
9. Kryshtal A. N. Low-frequency wave instabilities in a plasma with a quasi-static electric field and weak spatial inhomogeneity // J. Plasma Phys.—2002.—68, N 2.—P. 137—148.
10. Spicer D. F. An unstable arch model of a solar flare // Solar Phys.—1977.—53.—P. 305—344.
11. Vermazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of solar chromosphere. III. Models EUV Brightness components of the quite Sun // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1981.—45.—P. 635—725.

SMALL-SCALE INSTABILITIES IN THE PREFLARE LOOP PLASMAS IN ACTIVE REGIONS

A. N. Kryshtal, S. V. Gerasimenko, A. D. Vojtsekhovskaya

Physical conditions for rise and development of different types of plasma instabilities at the origin of a flare process were studied. The main reason of the instability is the summary action of three factors, namely, the existence of quasi-static large-scale electric field in a loop, the influence of the pair Coulomb collisions as well as the influence of the inhomogeneities of plasma temperature and density. The model of interacting magnetic fluxes of Heyvaerts-Priest-Rust and the model of the loop equivalent current circuit of Stepanov-Zaitsev were used as the models of a flare process. The process begins with the rise of the first instability having the lowest threshold of excitation, and the initial stage of the process finishes with the appearance of the current layers. It is shown that adiabatically slow growth of the amplitude of subdreibler electric field in a loop corresponds to the distinct order of the appearance of the definite type of instabilities at the various parts of current circuit. Our results can be considered as the necessary condition for the short-time prediction of the flare in the loop structure.

УДК 523.942-466

Р. И. Костык

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Волновые движения в необычном образовании солнечной атмосферы

Представлено 25.06.07

Наведено результати дослідження хвильової та конвективної складових полів швидкості та інтенсивності в яскравому фотосферному утворенні (plume), яке рідко спостерігається в сонячній грануляції. Спектральні спостереження проведени в спокійній ділянці поблизу центру сонячного диску на телескопі VTT (о. Тенерифе, Іспанія) в лінії Fe I λ 639.36 нм.

В августе 2001 г. на Германском башенном вакуумном телескопе (VTT), расположеннном на о. Тенерифе (Испания), Е. Хоменко были проведены спектральные наблюдения спокойной области вблизи центра солнечного диска в линии нейтрального железа Fe I λ 639.36 нм. Наблюдения продолжались в течение 158 мин. Исследуемая область экспонировалась каждые 10 с. Во время наблюдений дрожание солнечной поверхности на входной щели спектрографа не превышало 0.40".

Следуя стандартной процедуре, все 943 изображений (экспозиций) этой линии мы исправили за темновой ток, изменения прозрачности земной атмосферы во время наблюдений и за неодинаковую

чувствительность отдельных пикселов. С помощью метода «лямбда-метр» [5] для каждого положения вдоль щели спектрометра и для каждого момента времени наблюдений на 11 разных уровнях профиля линии, что соответствует 11 разным высотам в атмосфере Солнца (от 5 до 490 км), мы измерили вариации интенсивности и скорости относительно их средних значений. Просматривая двумерные (положение вдоль щели — время) поля интенсивности, мы обнаружили на высотах $H = 200$ —490 км яркое образование, которое существовало на протяжении всего времени наблюдений.

На рис. 1 приведен общий вид этого образования на высоте $H = 490$ км. Его размеры вдоль щели

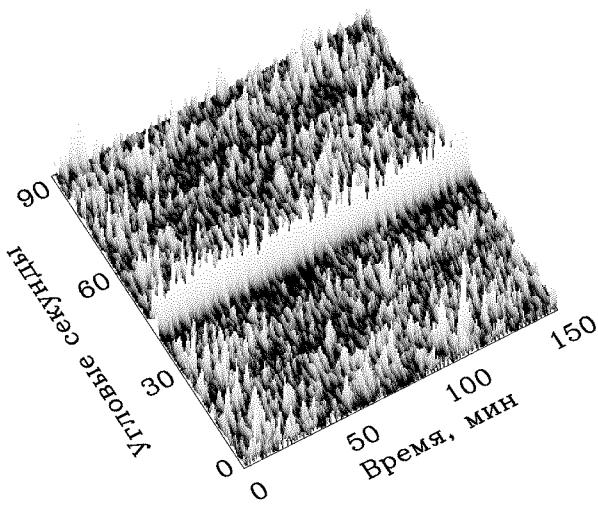


Рис. 1. Необычное яркое образование, наблюдаемое в линии нейтрального железа Fe I λ 639.36 нм в спокойной атмосфере вблизи центра солнечного диска на высоте $H = 490$ км над уровнем образования непрерывного спектра

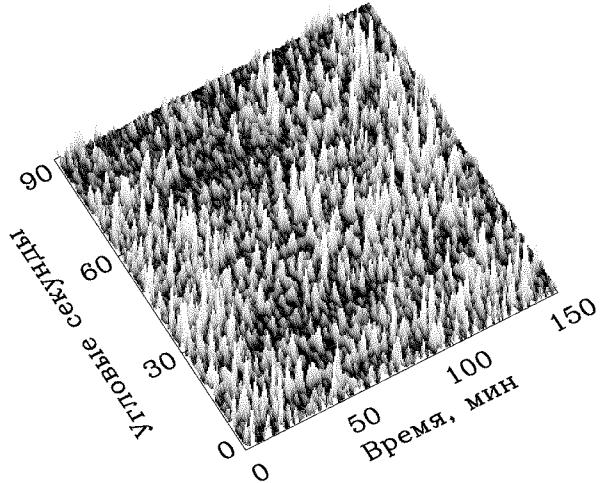


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но на высоте $H = 5$ км

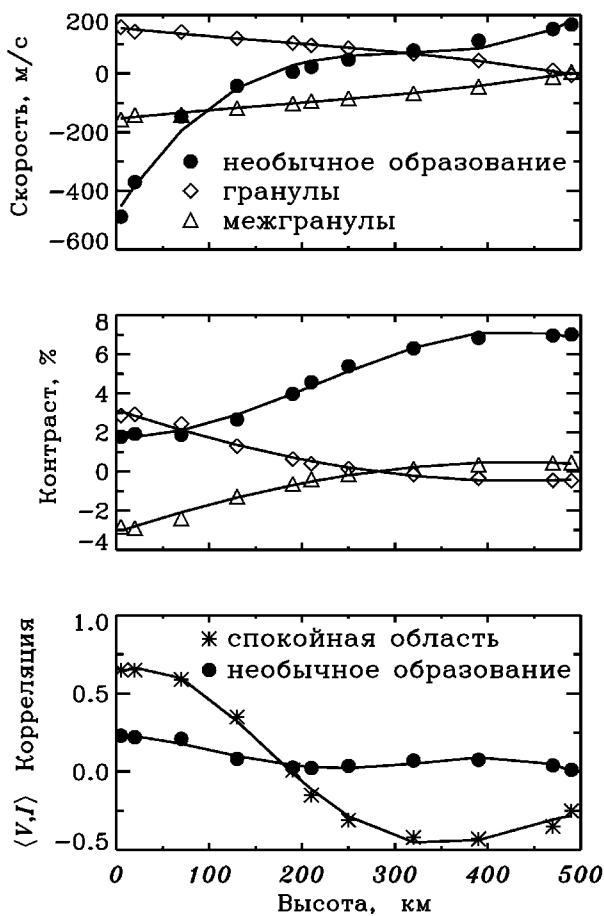


Рис. 3. Скорости (верхняя панель) и интенсивности (средняя панель) конвективных движений в гранулах (ромбы), межгранулах (кружки) и в необычном образовании (треугольники) в зависимости от высоты в солнечной атмосфере. На нижней панели — коэффициент корреляции между направлением скорости и относительным контрастом для спокойной области (звездочки) и для необычного образования (кружки). Средняя квадратичная погрешность приведенных данных составляет 7–10 %

спектрографа составляли 2000–2500 км. Для сравнения на рис. 2 показана та же область на поверхности Солнца, но на высоте $H = 5$ км: яркое образование отсутствует. Мы нашли лишь две статьи, где описываются, на наш взгляд, аналогичные образования. Espagnet et al. [2] называют эти образования «bright sinking plumes». Их относительный контраст увеличивается с высотой и достигает максимума на $H = 250$ –550 км, крупномасштабные скорости направлены вглубь фотосферы. Roudier et al. [4], наблюдая plumes в течение 16 мин, приводят величины интенсивности и скорости этих образований на разных высотах в атмосфере и в разные моменты времени наблюдений.

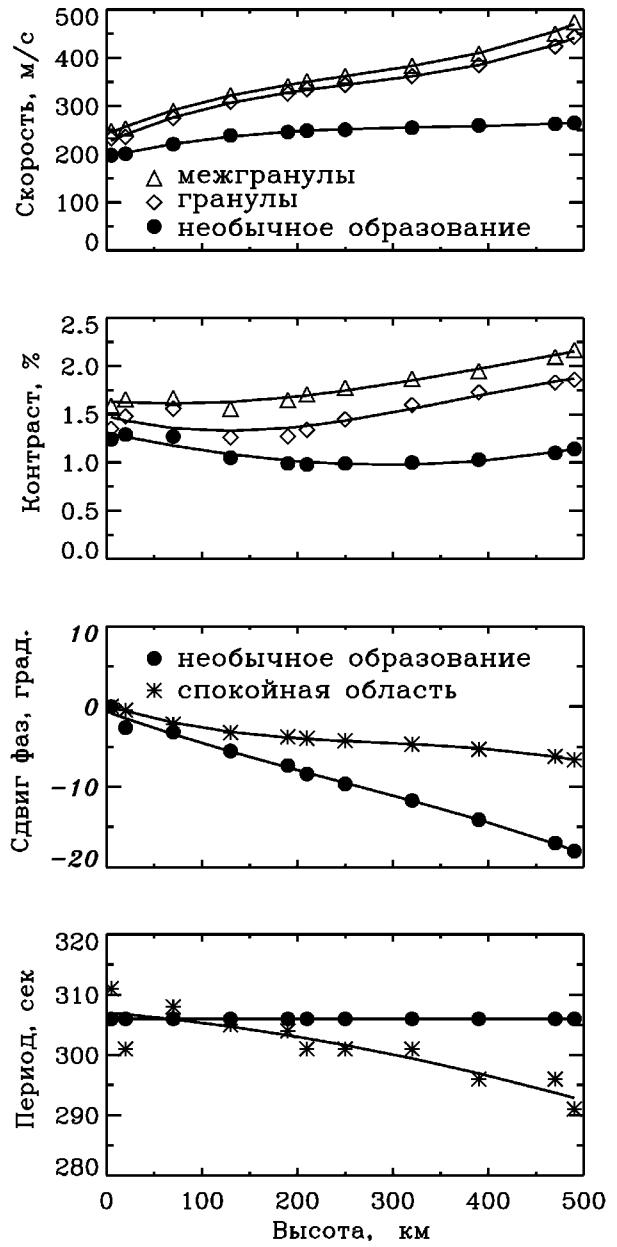


Рис. 4. Усредненные по времени и пространству скорости (верхняя панель) и интенсивности (вторая панель) волновых движений в гранулах (ромбы), межгранулах (треугольники) и необычном ярком образовании (кружки) на разных высотах в атмосфере Солнца. Третья панель — сдвиг фаз между колебаниями скорости на высоте $H = 5$ км и всеми другими высотами в невозмущенной фотосфере (звездочки) и необычном образовании (кружки). На нижней панели показана зависимость периода колебаний волновых движений от высоты в «спокойной» области (звездочки) и для необычного образования (кружки). Среднеквадратичная погрешность приведенных данных составляет 7–10 %

Авторы отмечают значительные нисходящие движения в plumes.

Цель нашей работы подробно исследовать волновые и конвективные поля интенсивности и скорости в plumes на разных высотах в атмосфере Солнца.

Построив диагностическую $k\text{-}\omega$ -диаграмму, на которой мощность представлена в зависимости от временной (ω) и пространственной (k) частот, мы обнаружили, что в необычном образовании, аналогично спокойной области, присутствуют вариации интенсивности и скорости с периодами вблизи 5 и 10 мин. Как известно, в спокойной области за эти колебания ответственны 5-минутные волны, а также конвекция. Для удобства мы будем называть волновыми и конвективными движениями также и аналогичные колебания в необычном образовании.

В соответствии с диагностической диаграммой мы разделили конвективную и волновую составляющие полей интенсивности и скорости в необычном образовании и в спокойной области. Более подробно эта процедура описана в нашей предыдущей работе [3].

На рис. 3 приведены результаты наблюдений конвективной составляющей полей интенсивности и скорости, усредненные по времени и пространству, отдельно для гранул, межгранул и необычного образования. Мы приняли движения, направленные к наблюдателю, за положительные. На верхней панели нанесены средние квадратичные амплитуды скорости этих образований на разных высотах в атмосфере Солнца. Над гранулами вещество в основном поднимается, а над межгранулами — опускается. В необычном образовании на высотах 5—200 км преобладают нисходящие движения, а выше 200 км — восходящие, причем в отличие от гранул и межгранул, последние движения с высотой увеличиваются.

На средней панели мы сравниваем средние квадратичные амплитуды интенсивности для разных образований в зависимости от высоты. Как и следовало ожидать, контраст гранул и межгранул постепенно уменьшается от уровня образования континуума к уровню температурного минимума. Причем, на высоте около $H = 280$ км вещество над гранулой становится холоднее, чем над межгранулой (более подробно см. [1]). Отметим, что классическое определение понятий гранула и межгранула относится лишь к уровню образования континуума. На всех других высотах такое определение теряет свой первоначальный смысл. Относительный же контраст необычного образования непрерывно увеличивается с высотой. Такое поведение полей интенсивности и скорости в необычном образовании свидетельствует о его неконвективном происхождении. Окончательное подтверждение можно найти

на нижней панели рис. 3, из которого видно, что корреляция между интенсивностью и скоростью не превышает 0.25, а на высотах $H = 100$ —490 км она практически равна нулю.

На рис. 4 на разных высотах в атмосфере Солнца мы сравниваем усредненные по времени и пространству, волновые характеристики необычного образования и спокойной области. Из двух верхних панелей этого рисунка видно, что средние квадратичные амплитуды колебаний интенсивности и скорости в необычном образовании почти не зависят от высоты в солнечной атмосфере, в то время как в спокойной области — увеличиваются в полтора-два раза как над гранулами, так и над межгранулами. Сдвиг фаз между колебаниями скорости на высоте образования континуума и всеми другими высотами показывает (третья панель рис. 4), что волны, как в необычном образовании, так и в спокойной области близки к стоячим и распространяются снизу вверх, однако в необычном образовании сдвиг фаз больше, нежели в невозмущенных участках. Что касается периода колебаний, то в спокойной области, как и следовало ожидать, он незначительно уменьшается с высотой, в то время как в необычном образовании он практически постоянный (нижняя панель рис. 4).

В дальнейшем мы предполагаем определить физические условия в этом необычном фотосферном образовании и сравнить их с условиями в окружающей невозмущенной атмосфере Солнца.

1. Костык Р. И., Щукина Н. Г. Тонкая структура конвективных движений в фотосфере Солнца: наблюдения и теория // Астрон. журн.—2004.—81, № 9.—С. 846—858.
2. Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al. Penetration of the solar granulation into the photosphere: height dependence of intensity and velocity fluctuations // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1995.—109.—P. 79—108.
3. Kholomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // Astron. and Astrophys.—1989.—369.—P. 660—671.
4. Roudier Th., Eibe M. T., Malherbe J. M., et al. Temporal height properties of the exploding granules // Astron. and Astrophys.—2001.—368.—P. 652—661.
5. Stebbins R. S. T., Goode P. R. Waves in the solar photosphere // Solar Phys.—1987.—110.—P. 237—253.

WAVE MOTIONS IN AN EXTRAORDINARY OBSERVED SOLAR PHENOMENON

R. I. Kostik

Flow and wave motions are analysed in a rather rare bright phenomenon (so-called plume) observed in the solar granulation. The spectral observations were made in the iron line Fe I 639.36 nm in a quiet granulation area near the solar disc centre with the German Vacuum Tower telescope in Tenerife.

Ю. Л. Колесник, Б. О. Шахов

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Поширення космічних променів у просторово-неоднорідному міжпланетному розсіювальному середовищі

Представлено 25.06.07

Розглядається випадок, коли міжпланетне стохастичне магнітне поле моделюється як просторово-неоднорідне розсіювальне середовище з коефіцієнтом дифузії, пропорційним відстані до Сонця. Задача поширення галактических космічних променів (КП) в такому середовищі розв'язується аналітичним ітераційним методом. Метод базується на мализіні ступеня анізотропії КП. Ітераційний розв'язок порівнюється з точним аналітичним розв'язком для неоднорідного середовища, а також з ітераційними розв'язками, що описують різні ефекти поширення КП у геліосфері при залежності параметрів розсіювання від енергії частинок. Показується, що двох ітерацій достатньо для опису інтенсивності КП. Показано також, що в такій моделі інтенсивність КП значно менша біля Сонця, ніж у моделі із сталим у просторі коефіцієнтом дифузії КП.

ВСТУП

Моделювання комплексу явищ так званої «космічної погоди» вимагає наявності точних аналітических або наближених (з високим ступенем збіжності) аналітических розв'язків рівнянь переносу (як дифузійних, так і кінетичних) для того, аби мати змогу проводити тестування на цих відносно простих випадках при розрахунках складніших, тому й реалістичніших. Середня за період величина одинадцятирічної варіації галактических космічних променів (КП) може бути отримана розв'язуванням (при різних розсіювальних властивостях стохастичного міжпланетного магнітного поля) стаціонарної граничної задачі для конвекційно-дифузійного рівняння переносу. Проте можливості отримати такі аналітичні розв'язки дуже обмежені. Чисельні розрахунки не вирішують проблеми, тому що рівняння описуються трьома і більше змінними [8]. Крім того, часто треба мати якісні характеристики процесу і можливість вільно оперувати змінними в аналітических формулах — велика перевага перед чисельним розрахунком.

Відомі на цей час точні аналітическі методи розв'язку конвекційно-дифузійного рівняння можуть бути застосовані до дуже вузького кола задач, а саме сталого коефіцієнту дифузії космічних променів і сталої швидкості сонячного вітру [2—5, 9].

Спроби розв'язати ці рівняння аналітично не тільки для сталих значень цих параметрів наштовхуються на серйозні математичні труднощі. Тому розвиток нових аналітических методів рішення дифузійно-конвекційного рівняння вкрай потрібен.

ПОРІВНЯННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, ОТРИМАНОЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ТОЧНОГО АНАЛІТИЧНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ГРАНИЧНОЇ ЗАДАЧІ ТЕОРІЇ ПОШИРЕННЯ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, З АНАЛІТИЧНИМ ІТЕРАЦІЙНИМ РОЗВ'ЯЗКОМ

У стаціонарному випадку фізики процесу така: сонячний вітер «виносе» із геліосфери галактическі КП, які через дифузію приходять із міжзоряного середовища у міжпланетний простір. Крім того, відбувається зміна енергії часток, обумовлена балансом зустрічних і доганяючих зіткнень часток із рухомими неоднорідностями. В цьому випадку рівняння може бути записане як рівняння нерозривності у фазовому просторі для змінних r, p . Оскільки ми обмежуємося випадком просторової сферичної симетрії і дифузії (ми не цікавимся напрямком імпульсу частки), нам достатньо буде радіальної складової дивергенції, просторової і в імпульсному просторі відповідно.

Отже, рівняння переносу можна подати у вигляді

$$\operatorname{div} j = -\operatorname{div} j_p, \quad (1)$$

де

$$j = -\chi \frac{\partial N}{\partial r} - \frac{p}{3} \frac{\partial N}{\partial p} u$$

— потік КП,

$$j_p = \frac{u \cdot p}{3} \frac{\partial N}{\partial r}$$

— потік у просторі імпульсів.

За розв'язком рівнянь аналітичним ітераційним методом [6] рівняння (1) можна подати у вигляді

$$\operatorname{div} j_n = -\operatorname{div} j_{p_{n-1}}.$$

Метод базується на мализні ступеня анізотропії КП: радіальний потік КП для сферично-симетричного сонячного вітру у всьому об'ємі майже дорівнює нулю, тому розв'язок у першому наближенні знайдеться із умови, що $j_0 = 0$, а перша поправка — із рівняння $\operatorname{div} j_1 = -\operatorname{div} j_{p_0}$. Тоді загальний розв'язок буде мати вигляд $N = N_0 + N_1$, де N_0 , N_1 — перша і друга поправка концентрації КП відповідно. На границі спектр подається у вигляді степеневого закону за повною енергією, що описує як високо- так і низькоенергетичні частинки, а в імпульсних змінних він має вигляд

$$N(r_0, p) = \eta^{-1} (1 + \eta^2)^{-(y+1)/2},$$

де $\eta = p/(m_0 c)$, $y = 2.5$ — показник степеня, r_0 — радіус геліосфери.

Після багатьох перетворень отримаємо ітераційний розв'язок для неоднорідної геліосфери:

$$N_1 = \frac{5}{3} N_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right) \eta \right] \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) + \\ + \frac{10}{3} \int_{\frac{r}{r_0}}^1 \frac{1}{\psi^2} \int_0^\psi N_0 \left[\left(\frac{r_\xi}{\psi r_0} \right)^{-1} \eta \right] \xi d\xi d\psi,$$

де

$$N_0 = \eta^{-1} \left(\frac{r}{r_0} \right) \left[1 + \eta^2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right]^{-(y+1)/2}.$$

Ефективність даного ітераційного методу можна перевірити з точним аналітичним розв'язком для випадку неоднорідної геліосфери, який можна отримати за допомогою перетворень Меліна [7], для однорідної геліосфери ефективність методу перевірялась в роботі [6] для порівняння з отриманими в статті результатами приведені нижче на графіках результати роботи [6]:

— для високoenергетичних частинок ($\eta \geq 1$):

$$N = \sum_{n=0}^{\infty} C_{-\frac{(y+1)}{2}}^n \eta^{-y-2-2n} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2+\sqrt{1/4+2(y+2+2n)}};$$

— для низькоенергетичних частинок ($\eta < 1$)

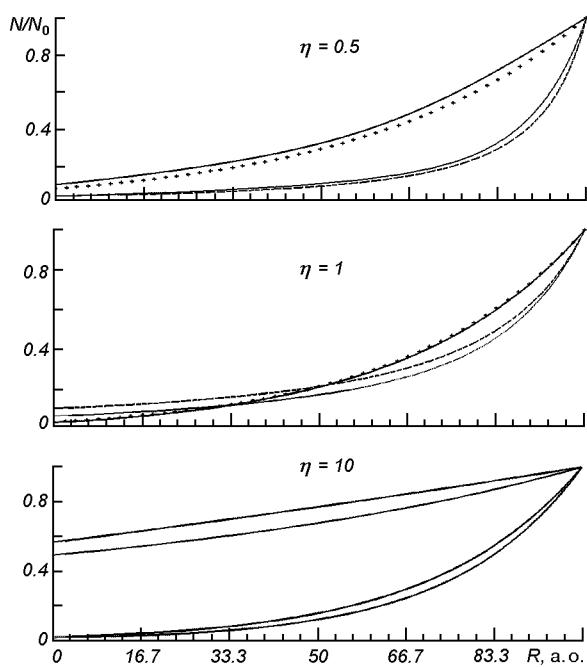
$$N = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} C_{-\frac{(y+1)}{2}}^n \eta^{2n-1} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2+\sqrt{1/4+2(1-2n)}} \times \right. \\ \times \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{\ln(\eta^{-1})}{2}} \sqrt{\frac{1}{4} + 2(1-2n)} - \right. \\ \left. \sqrt{\frac{1}{2\ln(\eta^{-1})} \ln \left(\frac{r_0}{r} \right)} \right) - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2+\sqrt{1/4+2(1-2n)}} \times \\ \times \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{\ln(\eta^{-1})}{2}} \sqrt{\frac{1}{4} + 2(1-2n)} + \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{1}{2\ln(\eta^{-1})} \ln \left(\frac{r_0}{r} \right)} \right) + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2+\sqrt{1/4+2(1-2n)}} + \\ \left. + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2-\sqrt{1/4+2(1-2n)}} \right] + \\ + \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{\infty} C_{-\frac{(y+1)}{2}}^m \eta^{-y-2-2m} \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2+\sqrt{1/4+2(y+2+2m)}} \times \right. \\ \times \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{\ln(\eta^{-1})}{2}} \sqrt{\frac{1}{4} + 2(y+2+2m)} - \right. \\ \left. - \sqrt{\frac{1}{2\ln(\eta^{-1})} \ln \left(\frac{r_0}{r} \right)} \right) + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2-\sqrt{1/4+2(y+2+2m)}} \times \\ \times \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{\ln(\eta^{-1})}{2}} \sqrt{\frac{1}{4} + 2(y+2+2m)} + \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{1}{2\ln(\eta^{-1})} \ln \left(\frac{r_0}{r} \right)} \right) + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2+\sqrt{1/4+2(y+2+2m)}} - \\ \left. - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2-\sqrt{1/4+2(y+2+2m)}} \right].$$

Тут $\operatorname{erf}(x)$ — інтеграл ймовірностей [1].

Коли $r \rightarrow 0$, то і інтенсивність також прямує до нуля, на відміну від випадку просторово-однорідного середовища [3, 6]. Як видно, аналітичний розв'язок для випадку просторово-неоднорідного розсіювального середовища є досить громіздким, особливо для випадку концентрації КП для низькоенергетичних частинок. Порівняння даного аналітичного ітераційного розв'язку з точним аналітичним розв'язком для неоднорідного середовища, а також з ітераційними розв'язками, що описують ефекти поширення КП у геліосфері при наявності залежності коефіцієнта дифузії від енергії, проілюстровано на рисунку.

ВИСНОВКИ

Концентрація КП, отримана за допомогою ітераційного методу, де враховано всього дві поправки



Залежність концентрації КП нормованої до концентрації на межі геліосфери (N/N_0) від геліоцентричної відстані R (для випадків $p/(m_0c) = 0.5, 1, 10$)

розв'язку дифузійно-конвекційного рівняння, майже не відрізняється від концентрації КП, отриманої аналітично. Розв'язок, отриманий цим методом може бути застосований замість точного розв'язку для неоднорідної геліосфери.

Ітераційний метод можна застосувати для більш складних задач, там де аналітичний розв'язок отримати неможливо.

В моделі просторово-неоднорідного розсіювального середовища передбачається значне зниження інтенсивності КП, на відміну від моделі з просторово-однорідним коефіцієнтом дифузії.

1. Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. — М.: Наука, 1979.—830 с.
2. Долгинов А. З., Топтыгин И. Н. О диффузии космических частиц в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия.—1967.—7, № 6.—С. 967—973.
3. Долгинов А. З., Топтыгин И. Н. Теория движения космических частиц в межпланетных магнитных полях // Труды пятой Всесоюзной школы по космофизике. — Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1968.—С. 167—182.
4. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. — М.: Наука, 1975.—462 с.
5. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. — М.: Наука, 1983.—302 с.
6. Шахов Б. А., Колесник Ю. Л. Итерационный метод решения краевых задач теории распространения космических лучей // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 2.—С. 101—108.
7. Dorman L. I., Fedorov Yu. I., Katz M. E., et al. Variations of the cosmic rays' energy in the interplanetary space // Astrophys. and Space Sci.—1983.—94.—P. 43—95,
8. Goldstein M. L., Fisk L. A., Ramaty R. Energy loss of cosmic rays in the interplanetary medium // Phys. Rev. Lett.—1970.—25, N 12.—P. 832—838.
9. Webb G. M. Monoenergetic-source solutions of the steady-state cosmic ray equation of transport // Astrophys. and Space Sci.—1977.—50.—P. 349—360.

COSMIC RAY PROPAGATION IN THE SPATIALLY INHOMOGENEOUS INTERPLANETARY SCATTERING MEDIUM

Yu. L. Kolesnyk, B. A. Shakhev

The case when the interplanetary stochastic magnetic field is modeled as a spatially inhomogeneous scattering medium with the diffusion coefficient proportional to distance to the Sun. Galactic cosmic ray (CR) propagation problem in a medium of this sort is solved by the iteration method. The iteration solution is compared with exact analytical solution for inhomogeneous medium and also with iteration solutions to describe the different CR propagation effects in heliosphere when the scattering parameters depend on the particle energy. It is demonstrated that two iterations are sufficient to describe CR intensity. It is shown that CR intensity near the Sun is significantly smaller for this model than for the model with CR diffusion coefficient constant in space.