

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

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

київ

Том 10, № 5/6, 2004

KYIV

**МАТЕРІАЛИ
Четвертої Української конференції
з перспективних космічних досліджень**

19—26 вересня 2004 р.

Proceeding of the 4-th Ukrainian Conference
for Perspective Space Researches
(19—26 September 2004)

ЗМІСТ

Лук'янченко В. І., Суворов В. В., Цимбалюк М. М., Васильєва Т. В., Головінkin А. В. Перспективи дальнейшего разви-тия совместной российско-украинской программы исследо-ваний и экспериментов на РС МКС

Твердохлебова Е. М., Корсун А. Г., Габдуллин Ф. Ф., Карабаджак Г. Ф. Электроразрядные процессы в плазменном окружении МКС

Івченко В. М., Козак Л. В., Венедиктов Ю. І., Збрuczь-кий О. В., Корепанов В. Є., Крючков Є. І., Лізунов Г. В., Луkeniuk A. A., Fedorenko A. K. Проект «Геокосмос» для Українського молодіжного супутника

Видъмаченко А. П., Мороженко О. В. Картирование физиче-ских характеристик поверхности слоя Луны и ультрафио-летовая поляриметрия с орбитальной лунной станции

Неводовський Є. П., Відъмаченко А. П., Мороженко О. В., Неводовський П. В., Синявський І. І. Український моло-діжний супутник: дослідження аерозольного шару атмос-фери Землі за допомогою УФ-поляриметра

Іванов Ю. С., Синявський І. І., Сосонкін М. Г. Бортовой УФ-спектрополяриметр для мониторинга планетных атмос-фер

Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Меленевский Ю. А., Церков-ный А. І. Имитатор излучения Земли для термовакуумных испытаний космических аппаратов

Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г. Моделирова-ние лучистых потоков в имитаторах солнечного излучения

Гаврилов Р. В., Меленевский Ю. А., Конюхов С. Н., Дранов-ский В. І., Кошкин М. І., Алексеев Ю. С., Коротков А. С., Щеголь В. А., Соколов В. А., Еременко В. В., Комаров В. Г., Махонін Е. І. Стенд для тепловакуумных испы-таний космических аппаратов

Чесалин Л. С., Застенкер Г. Н., Круковская Е. В., Лакути-на Е. В., Луценко В. Н., Шевырев Н. Н. Бортовое информа-ционное обеспечение научной программы российско-украин-ского проекта «Интербол-Прогноз» (высокоапогейный спут-ник «Интербол-3»)

Абламейко С. В., Кравцов А. А., Меньшиков В. А., Пушкар-ский С. В. Космические исследования и разработки, прово-димые в рамках белорусско-российских программ «Космос-БР» и «Космос-СГ»

Барабанов Н. А., Бандуристый Л. М., Венедиктов Ю. І., Доваль С. Г., Селиванов Ю. А., Черемных О. К., Безру-ких В. В., Гдалевич Г. Л. Измерение времени пролета ин-жектируемых частиц в ходе проведения космического экспе-римента «Кольцо» на борту МКС

CONTENTS

- 6 Lukiaschenko V. I., Suvorov V. V., Tsimbaliuk M. M., Vasiliieva T. V., Golovinkin A. V. The prospects for further development of the joint Russian—Ukrainian program of investigations and experiments aboard the Russian Segment of the International Space Station
- 12 Tverdokhlebova E. M., Korsun A. G., Gabdullin F. F., Karabadzhak G. F. Electric discharge processes in the ISS plasma environment
- 17 Ivchenko V. M., Kozak L. V., Venedyktov Yu. I., Zbrutschkyi O. V., Korepanov V. Ye., Kriuchkov Ye. I., Lizunov G. V., Lukeniuk A. A., Fedorenko A. K. The Geocosmos Project for the Ukrainian Junior Satellite
- 21 Vid'machenko A. P., Morozhenko A. V. Mapping of physical characteristics of the Moon's superficial layer and ultra-violet polarimetry from a Lunar orbital station
- 27 Nevodovskyi Ye. P., Vid'machenko A. P., Morozhenko O. V., Nevodovskyi P. V., Sinyavskyi I. I. The Ukrainian youth satellite: Investigation of the Earth's aerosol stratum with the use of UV-polarimeter
- 32 Ivanov Yu. S., Sinyavsky I. I., Sosonkin M. G. On-board UV-spectropolarimeter for monitoring of planetary atmospheres
- 35 Gavrilov R. V., Kislov A. M., Melenevsky Yu. A., Tserkovny A. I. The simulator of the Earth's radiation for thermo-vacuum tests of spacecraf
- 38 Gavrilov R. V., Kislov A. M., Romanenko V. G. Computer simulation of radiant fluxes in solar simulators
- 42 Gavrilov R. V., Melenevskiy Yu. A., Konyukhov S. N., Dranovskiy V. I., Kosikhin M. I., Alekseev Yu. S., Korotkov A. S., Shogol V. A., Sokolov V. A., Eremenko V. V., Komarov V. G., Makhonin E. I. Stand rig facility for thermo-vacuum testing of space vehicles
- 47 Chesalin L. S., Zastenker G. N., Kruckovskaya Ye. V., Lakutina Ye. V., Lutsenko V. N., Shevyrev N. N. Onboard informa-tion service of the scientific program in the Russian-Ukrainian Project Interball-Prognoz (high-apogee spacecraft Interball-3)
- 52 Ablameiko S. V., Kravtsov A. A., Menshikov V. A., Pushkarskii S. V. Space investigations and developments within the framework of the Byelorussian-Russian Programs Cosmos-BR and Cosmos-SG
- 56 Barabanov N. A., Banduristiy L. M., Venediktov Yu. I., Dovgal S. G., Selivanov Yu. A., Cheremnykh O. K., Bezrukikh V. V., Gdalevich G. L. Injected particle time-of-flight measurements during the space experiment aboard the ISS

- Абурджанія Г. Д., Ломінадзе Д. Г., Хантадзе А. Г., Харшиладзе О. А.* Механізм генерації та характеристики поширення структур ультранизькочастотних іоносферних електромагнітних хвиль планетарного масштабу
- Черемных О. К., Парновский А. С.* Баллонные моды во внутренней магнитосфере Земли с учетом конечной проводимости ионосферы
- Кызыров Ю. В.* О возможных изменениях в спектрах неоднородностей электронной концентрации, получаемых при ракетных экспериментах в спорадическом Е-слое
- Рапопорт Ю. Г.* Новая фотохимически-электростатическая модель сейсмоионосферного взаимодействия и вариации приземного электрического поля перед землетрясениями
- Бахмутов В. Г.* Связь вариаций геомагнитного поля с изменением атмосферной циркуляции и климата в Европе
- Яременко Л. Н., Мозговая Т. А.* Сопряженность магнитных суббульб в средних широтах северного и южного полушарий
- Яременко Л. Н., Мельник Г. В.* Магнитные бури в экваториальном поясе и полярных областях
- Лысенко В. Н., Черняк Ю. В.* Особенности методики определения параметров ионосферной плазмы во время естественных возмущений в ионосфере
- Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Радарные наблюдения волновых процессов в ионосфере, сопутствовавших полетам космических аппаратов
- Агапитов А. В.* Распространение низкочастотных волновых пакетов Ps6 в хвосте магнитосферы после магнитной суббури
- Панасенко С. В., Черногор Л. Ф.* Результаты исследования волновых возмущений в мезосфере
- Ладиков-Роев Ю. П., Логинов А. А., Маслова Н. В., Черемных О. К.* Модель спикулы в солнечной короне
- Ладиков-Роев Ю. П., Линник А. А., Сальников Н. Н., Черемных О. К.* Магнитно-вихревая модель выбросов корональной массы
- Гопасюк О. С., Гопасюк С. И.* О колебаниях полутени солнечных пятен
- Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А.* Вращение активных областей и корональных дыр по наблюдениям Солнца в линии He I λ 1083 нм
- Степанов А. В., Цап Ю. Т., Копылова Ю. Г., Куприянова Е. Г.* Корональные петли и пульсации излучения вспыхивающих звезд
- Фиделис В. В.* Вариации синхротронного и инверсного комптоновского излучения от блазара 1ES 1959+650 в 2003 г.
- Минин О. А., Лобанов В. Ф., Якубовский В. П.* Современная система слежения за искусственными спутниками Земли для станции «Кацивели-1893»
- 62** *Aburjania G. D., Lominadze J. G., Khantadze A. G., Kharshiladze O. A.* Generation mechanism and features of propagation of the ULF planetary-scale electromagnetic wavy structures in the ionosphere
- 82** *Cheremnykh O. K., Parnowski A. S.* Ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth with finite ionospheric conductivity
- 86** *Kyzyurov Yu. V.* On possible changes in electron-density irregularity spectra obtained during rocket experiments in sporadic-E
- 90** *Rapoport Yu. G.* New photochemistry-electrostatic model of seismoionospheric coupling and variations of near-ground quasistatic electric field before earthquakes
- 93** *Bakhmutov V. G.* The connection between geomagnetic secular variations and atmospheric circulation and climate changes in Europe
- 100** *Yaremenko L. N., Mozgovaya T. A.* Conjugativity of magnetic substorms within middle latitudes of the northern and southern hemispheres
- 106** *Yaremenko L. N., Melnik G. V.* Magnetic storms in the equatorial belt and in polar regions
- 110** *Lysenko V. N., Cherniak Yu. V.* Some peculiarities of the procedure for determination of ionospheric plasma parameters during natural disturbances in the ionosphere
- 113** *Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F.* Radar observations of wave-like disturbances in ionosphere, associated with space vehicle flights
- 117** *Agapitov A. V.* Ps6 propagation in the Earth magnetosphere tail after magnetic substorms
- 122** *Panasenko S. V., Chernogor L. F.* Some results of investigation of wave disturbances in the mesosphere
- 128** *Ladikov-Roev Yu. P., Loginov A. A., Maslova N. V., Cheremnykh O. K.* A model of a spicule in the solar corona
- 131** *Ladikov-Roev Yu. P., Linnik A. A., Salnikov N. N., Cheremnykh O. K.* Magneto-vortical model of coronal mass ejection
- 135** *Gopasyuk O. S., Gopasyuk S. I.* On sunspot penumbra oscillations
- 138** *Zyelyk Ya. I., Stepanian N. N., Andreeva O. A.* Rotation of active regions and coronal holes from observations of the Sun in the line He I λ 1083 nm
- 141** *Stepanov A. V., Tsap Yu. T., Kopylova Yu. G., Kupriyanova E. G.* Coronal loops and pulsations of radiation from flare stars
- 145** *Fidelis V. V.* Variations of synchrotron and inverse Compton radiation from the blazar 1ES 1959+650 in 2003
- 148** *Minin O. A., Lobanov V. F., Yakubovsky V. P.* The modern system for tracking over artificial Earth satellites at the “Katsiveli-1893” station

- Епішев В. П., Ісаак І. І., Мотруніч І. І., Новак Э. І.* Метод определения величины и природы возмущений, оказывающих воздействие на вращение ИСЗ
- Кузин С. П., Татевян С. К.* Мониторинг движения геоцентра по данным спутниковых измерений систем GPS, DORIS и SLR
- Єпішев В. П., Мотруніч І. І., Клімік В. У.* Ризик зіткнення штучних космічних об'єктів на геосинхронних орбітах
- Каблак Н. І., Клімік В. У., Швалигін І. В., Каблак У. І.* Моніторинг випадаючої водяної пари за допомогою GPS для прогнозування погоди
- Машченко А. Н., Федякін А. І.* Оптимизация параметров космического аппарата дистанционного зондирования земли по критерию экономической эффективности
- Волошин В. І., Левенко А. С.* Система экологического мониторинга ветровых электростанций Украины с использованием ДЗЗ
- Кравцов С. Л., Орешкина Л. В.* Обработка данных дистанционного зондирования для обнаружения и распознавания классов объектов
- Волошин В. І., Корчинский В. М., Негода А. А.* Повышение информативности панхромных цифровых изображений дистанционного зондирования Земли
- Капустин Е. І., Кириллов А. І., Махонін Е. І., Волох К. Ф.* Создание структуры архива данных дистанционного зондирования Земли Национального космического агентства Украины
- Волошин В. І., Бушуев Е. І., Марченко В. Т., Федоров О. П.* Принципы построения и функционирования системы геоинформационного космического обеспечения
- Волошин В. І., Бушуев Е. І., Паршина О. І., Панкратов А. Ю., Глушченко А. М.* Один из подходов к определению площади озимых культур с использованием данных космических съемок
- Волошин В. І., Бушуев Є. І., Паршина О. І., Федоров О. П.* Методика класифікації покривних елементів ландшафту
- Волошин В. І., Левенко А. С., Переметчик Н. Н.* Прогнозирование проявлений опасных геологических процессов в городе Днепропетровске с использованием методов аэрокосмического дистанционного зондирования Земли
- Руденко А. В., Савельев Ю. В., Коваль Э. З., Ленова Л. І., Волощук Е. М.* Концептуальные аспекты создания гибкостойких полиуретанов целевого назначения
- Міщенко Л. Т., Тороп В. В., Міщенко І. А.* Вплив клиностатування на електропровідність тканин вірусінфікованих листків пшениці
- Гамалея Н. Ф., Шишко Е. Д., Горобець О. Б.* Клеточная модель для изучения влияния измененной гравитации на циркадианную ритмику человека
- Адамчук-Чала Н. І.* Вплив кліностатування на трансформацію етіопластів в хлоропласти паростків ячменю
- 152** *Epishev V. P., Isak I. I., Motrunich I. I., Novak E. J.* A procedure for determination of value and nature of disturbances acting on rotation of AES
- 156** *Kuzin S. P., Tatevian S. K.* Monitoring of the geocentre motions on the basis of DORIS, GPS, and SLR data
- 159** *Epishev V. P., Motrunych I. I., Klimyk V. U.* Hazard of collisions of artificial space objects in geosynchronous orbits
- 163** *Kablak N. I., Klimyk V. U., Shvalagin I. V., Kablak U. I.* Monitoring of the besieged water vapour with the help of GPS for weather prediction
- 167** *Mashchenko A. N., Fedyakin A. I.* Parametric optimization of Earth-observation spacecraft according to criterion for economic efficiency
- 171** *Voloshyn V. I., Levenko A. S.* System of Ukrainian wind power stations ecological monitoring with the use of remote sensing of the Earth
- 175** *Kravtsov S. L., Oreshkina L. V.* Processing of remote sensing data for detection and recognition of object classes
- 178** *Voloshyn V. I., Korchinski V. M., Negoda O. O.* Enhancement of informativeness of panchromatic space digital images
- 181** *Kapustin Ye. I., Kirillov O. I., Makhonin Ye. I., Volokh K. F.* Remotely sensed data archive of National Space Agency of Ukraine: Creation of structure and ways of integration
- 184** *Voloshyn V. I., Bushuyev Ye. I., Marchenko V. T., Fedorov O. P.* Principles of construction and functioning of geoinformational space support system
- 187** *Voloshyn V. I., Bushuyev Ye. I., Parshina O. I., Pankratov A. Y., Glushchenko A. M.* Actual problems of agrarian land resources control and ways of their solution with the use of space surveys data
- 190** *Voloshyn V. I., Bushuyev Ye. I., Parshina O. I., Fedorov O. P.* Method of classification of integumentary landscape elements
- 194** *Voloshyn V. I., Levenko A. S., Peremetchik N. N.* Forecast of manifestations of dangerous geological processes in Dnipro-petrovsk with the use of methods of aerospace remote sensing of the Earth
- 197** *Rudenko A. V., Saveliev Yu. V., Koval E. Z., Lenova L. I., Voloschuk E. M.* Conceptual aspects in creation of fungus-resistant polyurethans having special purpose
- 200** *Mishchenko L. T., Torop V. V., Mishchenko I. A.* Clinorotation effects on virus infected wheat leaf tissue electric conductivity
- 204** *Gamaleia N. F., Shishko E. D., Horobets O. B.* A cell model for the study of altered gravitation effects on human circadian rhythmicity
- 208** *Adamchuk-Chala N. I.* Clinorotation effect on the transformation from etioplasts to chloroplasts for barley seedlings

- Артеменко О. А., Попова А. Ф. Экспрессия δ-циклинов на ранних стадиях развития зародышей *Brassica rapa* L. в условиях клиностатирования*
- Воловик О. И., Сытник С. К., Топчий Н. Н. Влияние имитированной невесомости (клиностатирования) на фотосинтетический аппарат растений ячменя (*Hordeum Vulgare* L.)*
- Козеко Л. Е. Актин проростков *Beta vulgaris* при клиностатировании*
- Козироўська Н. О., Корнійчук О. С., Вознюк Т. М., Ковальчук М. В., Литвиненко Т. Л., Рогуцький І. С., Митрохин О. В., Естrella-Ліопіс В. Р., Бородінова Т. І., Mashkovs'ka С. П., Foing B. Г., Kordyum V. A. Використання мікробної спільноти у попередньому сценарії вирощування *Tagetes patula* у місячній оранжерей*
- Носач Л. Н., Повница О. Ю., Жовноватаia В. Л. Исследование влияния клиностатирования на состояние перевиваемых линий клеток человека*
- Шниукова Є. І., Недуха О. М. Вплив імітованої мікрогравітації на формування запасних полісахаридів міні-бульб картоплі*
- Юбилей Прометея. К 85-летию со дня рождения члена-корреспондента АН УССР Николая Федоровича Герасюты**
- НАШІ АВТОРИ**
- 211** *Artemenko O. A., Popova A. F. The δ-cyclin expression at early stages of embryogenesis of *Brassica rapa* L. under clinorotation*
- 215** *Volovik O. I., Sytnik S. K., Topchiy N. N. Effect of the simulated weightlessness (clinorotation) on a photosynthetic apparatus of Barley Plants (*Hordeum vulgare* L.)*
- 218** *Kozeko L. Ye. Actin of *Beta vulgaris* seedlings under the clinorotation*
- 221** *Kozyrovska N. O., Korniichuk O. S., Voznyuk T. M., Kovalchuk M. V., Lytvynenko T. L., Rogutskyy I. S., Mytrokhin O. V., Estrella-Liopis V. R., Borodinova T. I., Mashkovs'ka S. P., Foing B. H., Kordyum V. A. Microbial community in a precursory scenario of growing *Tagetes patula* in a lunar greenhouse*
- 226** *Nosach L. N., Povnitsa O. Yu., Zhovnovataia V. L. Investigations of the influence of microgravity on the state of human cell lines*
- 229** *Shniukova Ye. I., Nedukha O. M. The influence of simulated microgravity on the formation of storage polysaccharides of potato minitubers*
- 233** *The eighty-fifth anniversary of the Corresponding Member of Academy of Sciences of USSR N. F. Gerasiuta*
- 237** **OUR AUTHORS**

Програмний комітет конференції

О. О. НЕГОДА, голова — Національне космічне агентство України

- В. М. КУНЦЕВИЧ, заступник голови — Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України
- Е. Л. КОРДЮМ — Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України
- Л. М. ЛИТВИНЕНКО — Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України
- В. І. ЛЯЛЬКО — Центр аерокосмічних досліджень Землі Національної академії наук України та Національного космічного агентства України
- В. В. ПИЛИПЕНКО — Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України
- Я. С. ЯЦКІВ — Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
- О. П. ФЕДОРОВ — Національне космічне агентство України

© В. И. Лукьянченко, В. В. Суворов,
М. М. Цимбалюк, Т. В. Васильева, А. В. Головинкин

Центральний науково-дослідний інститут машинобудування Федерального космічного агентства,
м. Корольов, Московська область, Росія

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКО-УКРАИНСКОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РС МКС

Наводиться короткий огляд стану робіт російської сторони з підготовки та реалізації першорядних спільних російсько-українських досліджень на Російському сегменті Міжнародної космічної станції (РС МКС), а також обговорюються результати попереднього розгляду деяких потенційно можливих напрямків розвитку спільних російсько-українських експериментів з використанням інфраструктури наявних і перспективних космічних комплексів.

К настоящему времени объединенными усилиями российских и украинских специалистов разработана, согласована и подготовлена к утверждению «Долгосрочная программа совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на Российском сегменте МКС» [1, 2].

Завершается подготовка к представлению на утверждение «Положения о порядке реализации «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на Российском сегменте МКС» и использования полученных результатов» с учетом Межправительственного соглашения по Международной космической станции и действующих соглашений по сотрудничеству в области космоса между правительствами России и Украины.

На российско-украинской рабочей встрече в Управлении пионерских программ Федерального космического агентства 27–28 мая 2004 года достигнута договоренность о том, что российская сторона дополняет своими предложениями «Положение о порядке реализации «Долгосрочной программы...» и передает его на согласование украинской стороне, имея в виду последующее его утверждение главами агентств.

Практическая реализация основных российско-украинских экспериментов первой очереди достигла этапов эскизного проектирования и создания научной аппаратуры (НА).

На совещании российских и украинских специалистов в НПО им. С. А. Лавочкина 19.04.2004 г. по обсуждению конструкции трибометра для совмест-

ного космического эксперимента (КЭ) «Материал-Трение» и в ходе последующих творческих дискуссий были согласованы основные характеристики бортового трибометра и составлена общая предварительная ведомость работ по подготовке КЭ «Материал-Трение» на 2004 г. К сожалению, достигнутые договоренности не в полной мере выполняются, что затрудняет подготовку и проведение бортового натурного эксперимента.

На техническом совещании, состоявшемся 29 июля 2004 г. в ЦНИИМАШ, был совместно рассмотрен проект технического задания ИПМ НАНУ на научную аппаратуру КЭ «Трубка» для испытаний тепловых труб (ТТ) внутри гермоотсека, а также обсуждены вопросы реализации единой системы измерения и управления для испытания ТТ внутри и вне гермоотсека.

Было принято решение, что для оптимизации затрат и сокращения сроков разработки НА для реализации КЭ «Трубка» российская и украинская стороны выпускают отдельные технические задания (ТЗ) на научную аппаратуру, размещаемую снаружи и внутри гермоотсека.

Рассматривается возможность изучения ТТ разработки Украины вне гермоотсека, то есть на научной аппаратуре, создаваемой российскими организациями. Предложено также для уменьшения массы, сокращения затрат и унификации НА совместно проработать и оценить возможность разработки и создания единой системы измерения и управления КЭ «Трубка» для НА вне и внутри гермоотсека.

Продолжаются работы по подготовке проектов Соглашений о совместных экспериментах и пла-

нов-графиков выполнения их первой очереди.

Практически завершено формирование межагентской рабочей группы по выработке процедуры и порядка передачи аппаратуры, поставляемой украинской стороной в ходе подготовки совместных экспериментов на РС МКС.

В соответствии с Решением совместного совещания Росавиакосмоса и НКАУ от 14.02.2003 г., российской стороной открыто финансирование работ российских организаций по следующим совместным экспериментам:

1. «Обстановка-1» — проводится разработка и отработка бортовой научной аппаратуры;
2. «Планетный мониторинг — Спектрометр-Поляриметр» — проводится разработка и отработка бортовой научной аппаратуры;
3. «Материал-Трение» — развернуты эскизное проектирование НА, разработка проектно-конструкторской документации, отработка элементов НА;
4. «Трубка» — завершается разработка ТЗ на НА;
5. «Морфос» — подготовлено и утверждено ТЗ на НА, проводится эскизное проектирование НА;
6. «Пента-Усталость» — осуществляется разработка методик исследований, выбор, подготовка и наземное изучение образцов материалов для натуральных экспериментов

По экспериментам «Биополимер» и «Биосорбент» открытие финансирования предполагается в новом финансовом году.

Завершается согласование ТЗ на КЭ и подготовка заключения о технической реализуемости космического эксперимента «Криокомплекс-Кипение».

Проводится научно-техническая экспертиза КЭ второй очереди. Продолжается формирование научно-технической и производственной кооперации для их реализации.

Разработаны предложения по развертыванию работ в области практической реализации перспективного многоразового космического корабля типа «Клипер» с применением ракеты-носителя (РН) «Зенит» и оценке возможностей его использования для выполнения совместных российско-украинских космических программ исследований и экспериментов.

В последнее время активно обсуждаются перспективы сотрудничества стран СНГ в проектах по рамочным программам исследований Европейского Союза. В период с 2002 по 2006 г. реализуется Шестая рамочная программа, в которой космические исследования были впервые выделены в самостоятельный раздел, хотя проблемы, решаемые в исследованиях на РС МКС, могут быть отнесены по крайней мере к пяти из семи разделов Шестой рамочной программы.

В январе 2003 г. в Москве прошел семинар по Шестой рамочной программе Европейского Союза, совместно организованный Европейской комиссией, Росавиакосмосом и ЕКА. Были проведены заседания по шести тематическим секциям, на которых выступали российские и европейские ученые, заинтересованные в развитии совместных исследовательских программ. В частности, докладывались материалы по состоянию подготовки эксперимента «Материал-Трение» по совместной российско-украинской программе исследований и экспериментов на РС МКС.

Достигнута принципиальная договоренность о том, что сопредседатели секций семинара с российской и с европейской стороны проведут работу по реализации совместных проектов и представят их на рассмотрение обоих агентств и Европейской комиссии. Для поддержки этой деятельности создается веб-сайт в интернете по совместным космическим исследованиям.

Следует отметить, что принципиальные договоренности по организации работ и подготовке совместных предложений пока не реализованы на уровне практических механизмов.

На сегодняшний день в вопросах участия российских научных и промышленных организаций в предполагаемых исследованиях не возникло большей определенности, чем имело место в период проведения семинара.

Для ряда экспериментов, предусмотренных проектом «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на российском сегменте МКС», в частности для КЭ «Материал-Трение», «Трубка», «Пента-Усталость», «Криокомплекс-Кипение», российская сторона активно прорабатывает возможности внедрения отечественных достижений в области новых композиционных материалов, в том числе многослойных металлических материалов, полученных методом сварки взрывом.

Наши зарубежные партнеры широко применяют МКС для целей популяризации молодежных научно-технических достижений.

К сожалению, РС МКС недостаточно активно используются в интересах образования, а также проведения научных исследований школьников, студентов, молодых ученых в России и Украине.

С учетом широкого развития на Украине творчества школьников, студентов, молодых ученых, целесообразно использовать неисчерпаемый творческий потенциал, знания и энергию молодежи для повышения качества образования различных уровней, а также получения значимых практических и научных результатов путем введения отдельным

разделом на основе конкурсного отбора лучших из имеющихся предложений в проект «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на Российском сегменте МКС» с разделением их по возрастным категориям.

В плазменном эксперименте «Тень», предусмотренном российской программой, на первом этапе предполагается отработка методики радиозондирования околоземного пространства с привлечением имеющегося на борту РС МКС комплекта радиолюбительского оборудования и наземной мерной радиолюбительской сети, формируемой с использованием возможностей интернета. На 18.02.2004 г. Восточно-Европейское мерное поле включало 52 заявки на участие в работах, Западно-Европейское мерное поле — 37 заявок, Северо-Американское мерное поле — 23 заявки, Австралийское мерное поле — 8 заявок. Всего поступило более 120 заявок. Работа по формированию наземной измерительной сети продолжается и имеет не только научное значение, но и пропагандирует достижения и потенциальные возможности пилотируемой космонавтики.

Радиолюбители Украины, известные своим высоким научно-техническим уровнем, могли бы более активно принимать участие в этих исследованиях.

В качестве положительной инициативы в области космического образования следует отметить появление первых российских предложений по научно-образовательным проектам на РС МКС («Кулоновский кристалл», «Светящаяся магнитосфера», МАИ-75), а также подписание Договора о совместной деятельности и Соглашения о сотрудничестве соответственно ЦНИИМАШ и РКК «Энергия» им. С. П. Королева с Московским городским дворцом детского (юношеского) творчества.

Мы надеемся, что совместно с украинскими учеными и специалистами в области образования, естественных и технических наук эта актуальная и перспективная область использования возможностей пилотируемой космонавтики будет интенсивно развиваться.

Как известно, эффективность бортовых исследований резко возрастает при их выполнении совместно с наземными средствами. С целью комплексного исследования плазменного окружения МКС как бортовыми, так и наземными устройствами при выполнении бортового космического эксперимента «Плазма-МКС» задействован радар некогерентного рассеяния Института солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск) для измерения отражательных характеристик комплексного космического объекта «станция + плазменная оболочка», в том числе и в момент включения двигателей ориентации.

Целесообразно проработать возможность использования для подобных целей и наземных систем аналогичного назначения, имеющихся в распоряжении украинской стороны.

Находящееся на борту РС МКС оборудование для дистанционного зондирования Земли и его выходные (целевые) характеристики (пространственная разрешающая способность, полоса обзора, пропускная способность средств передачи информации на Землю и др.) в настоящее время позволяют выполнять только некоторую часть актуальных задач.

Для расширения располагаемых технических возможностей планируется доставка на борт новых цифровых фотокамер и длиннофокусных объективов.

Предусматривается также применение телевизионной аппаратуры высокой четкости с соответствующими средствами для наземной обработки информации, просмотра и копирования получаемых видеоматериалов. В дальнейшем предполагается оснащение РС МКС видеоспектрометрической аппаратурой высокого спектрального разрешения в широком диапазоне электромагнитного спектра — от видимого до инфракрасного.

Всего на РС МКС планируется использовать более 30 видов различной аппаратуры дистанционного зондирования Земли: многочастотные радиолокаторы с синтезированной апертурой, радиометры для различных диапазонов электромагнитного спектра, многодиапазонные сканеры и спектрометры, зондировщики, лидары, спектрозональные и гиперспектральные датчики, оптико-электронные топографические камеры, видеоспектрометры, фотокамеры, газоаналитическую аппаратуру дистанционного зондирования и др.

Следует отметить, что мониторинг природной среды с борта РС МКС обеспечивается соответствующими программными средствами баллистико-навигационного отображения положения станции, трассы текущего витка, зоны видимости наземных измерительных пунктов, светотеневой обстановки на орбите, координат изучаемого района. Кроме того, имеется возможность прогнозирования момента и условий видимости заданных районов земной поверхности, а также оценки вероятности обнаружения и опознавания местности с учетом географических и метеорологических условий наблюдения (в том числе с учетом облачности). Все это повышает эффективность дистанционного зондирования Земли с борта РС МКС.

Значительный интерес вызывает использование РС МКС для проведения исследований и натурной отработки образцов перспективной аппаратуры, а также методов ее применения, в том числе аппаратуры, предназначеннной для установки на беспилот-

ные космические аппараты.

Результаты выполнения исследований на РС МКС показывают, что повышение эффективности целевого использования РС МКС за счет оптимизации планирования при имеющемся объеме бортовых ресурсов ограничено.

Для дальнейшего наращивания исследовательского потенциала необходимо развитие инфраструктуры РС МКС с соответствующим ростом располагаемых бортовых ресурсов.

Достигнутый на современном этапе технический уровень пилотируемой космонавтики может обеспечить МКС и перспективным космическим комплексам значительные возможности в осуществлении программ научных и прикладных исследований на основе использования робототехнических устройств и манипуляторов, трехосных стабилизируемых платформ (в том числе ориентируемых по вектору остаточных микроускорений), длинных выдвижных штанг и ферм, тросовых систем различного назначения, малых субспутников, средств измерения микроускорений и устройств для их эффективного демпфирования (пассивных и активных), а также автономных обслуживаемых специализированных модулей, используемых совместно с инфраструктурой орбитального пилотируемого комплекса.

Большое значение имеет наличие на борту криогенных устройств как для изучения физических явлений в криогенных жидкостях, так и для улучшения характеристик научной аппаратуры различных классов (в том числе с использованием макро-криогенных систем замкнутого цикла на температурный уровень 20 и 80 К).

В качестве конкретных шагов в этом направлении следует отметить разработку виброзащитной платформы с ориентацией по вектору остаточных микроускорений, а также использование грузового корабля типа «Прогресс» в качестве научной платформы для проведения широкого класса экспериментов. Оценки показывают, что с использованием кораблей типа «Прогресс» может быть выполнено в режиме «свободного дрейфа» с уровнем микроускорений (10^{-5} — 10^{-6}) g более 10 % экспериментов, заявленных в российской «Долгосрочной программе научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС».

Проведение экспериментов в режиме «пассивной гравитационной стабилизации» с ориентацией солнечных батарей в сторону Солнца (как подтвердили натурные эксперименты в мае 2004 г.) позволяет при том же уровне микроускорений выполнить на грузовом корабле типа «Прогресс» значительное количество технологических исследований, в том числе и по совместной российско-украинской про-

грамме, в частности прорабатывается возможность реализации по этой схеме совместного эксперимента «Криокомплекс-Кипение».

Предварительные оценки показывают, что возможности РС МКС обеспечивают проведение исследований по более чем 40 перспективным технологиям в интересах развития более 20 отраслей.

Имеются технически обоснованные предложения по созданию перспективной многоцелевой космической станции (МЦКС). По существующим представлениям МЦКС является высокоширотной обслуживаемой орбитальной станцией, главное отличие которой состоит в том, что наклонение ее рабочей орбиты составляет 65—73°. В отличие от МКС, с борта высокоширотной посещаемой станции можно изучать практически всю территорию России и высокоширотных регионов земной поверхности для решения широкого круга научно-технических и социальных задач как в беспилотном, так и в пилотируемом режимах полета.

Это позволит существенно расширить круг фундаментальных и прикладных геофизических исследований в высокоширотных областях околоземного космического пространства, где наблюдается высокая геомагнитная активность и связанные с ней явления-возмущения ионосферы, высыпания частиц, полярные сияния и т.д.

Ожидаемые результаты, по мнению ученых и специалистов, позволят лучше понять фундаментальные проблемы приполярной геофизики и физики солнечно-земных связей.

Указанный диапазон широт представляет значительный интерес при исследованиях природных ресурсов Земли, поскольку содержит основные энергоактивные зоны взаимодействия океана и атмосферы, районы землетрясений, геотермальной и вулканической активности, а также наиболее важные области землепользования, растительности, бассейнов крупных рек. Появляется возможность наблюдения практически всей заселенной территории Земли, что способствует осуществлению широкого международного сотрудничества в ходе целевого использования МЦКС.

Ожидается, что эксплуатация орбитальных пилотируемых комплексов — это лишь первый шаг по пути к планируемой активной деятельности человека в космосе.

Накопленный технический потенциал в недалеком будущем позволяет создать крупногабаритные космические платформы-аппараты нового поколения, с использованием которых можно проводить на качественно новом уровне фундаментальные исследования эволюции Вселенной и Солнечной системы, изучать принципиальные вопросы проис-

хождения жизни и ее распространения в космическом пространстве, развивать такие научные направления как астрофизика, исследование солнечно-земных связей, геофизические исследования, изучение природных ресурсов Земли, метеорология, физика невесомости, медицина и биология.

В настоящее время можно прогнозировать создание на орбите предприятий, производящих уникальные материалы, сверхчистые кристаллы, медицинские препараты. В перспективе можно представить созданные на орбите гигантские электростанции, которые позволят эффективно использовать солнечную энергию и оперативно передавать выработанную на орбите электроэнергию в различные районы Земли.

Новые аппараты потребуют проведения в космосе уникальных работ с участием человека по сборке и монтажу, техническому обслуживанию больших конструкций и дорогостоящего оборудования.

При решении научных и прикладных задач пилотируемые космические комплексы (ПКК) имеют ряд преимуществ по сравнению с автоматическими аппаратами.

К этим преимуществам относятся:

- налаженный грузопоток «Земля — ПКК — Земля»;
- развитая технология внекорабельной деятельности (ВнeКД) экипажа, что обеспечивает возможность установки и обслуживания целевой аппаратуры вне гермоотсеков;
- наличие унифицированных рабочих посадочных мест как внутри, так и на внешней поверхности гермоотсеков, обеспеченных интерфейсами электропитания, телеметрии, командно-информационного обмена;
- возможность использования сенсорных и интеллектуальных способностей человека-оператора при решении целевых задач;
- возможность в относительно сжатые сроки с высокой эффективностью провести летную отработку экспериментальной целевой аппаратуры.

В последнее время, в связи с катастрофой «Колумбии» и возникшими трудностями в завершении строительства МКС, в средствах массовой информации идут дискуссии по проблеме оценок сравнительной целевой эффективности пилотируемых космических комплексов и автоматических специализированных космических аппаратов.

Опыт развития космической техники показывает, что в настоящее время основными стратегическими целями космической деятельности являются:

- обеспечение безопасности жизнедеятельности человечества;

- использование ресурсов космоса;
- улучшение качества жизни;
- осмысление роли человека во Вселенной;
- расширение ареала обитаемости и экспансия человечества во Вселенной.

Достижение этих стратегических целей осуществляется в соответствии с основными последовательными этапами космической деятельности:

- исследование возможностей освоения и использования космического пространства;
- экспериментальные исследования с целью определения первоочередных работ;
- фундаментальные и научно-прикладные исследования для практического использования;
- освоение околоземного космоса и планет Солнечной системы;
- исследования и поиск возможностей достижения других планетных систем.

Указанные цели на каждом из отмеченных этапов достигались, и их предполагается осуществлять в будущем, оптимальным использованием автоматических и пилотируемых космических средств, выполняющих земные и космические миссии.

Так, околоземные искусственные спутники Земли (ИСЗ), наряду с решением фундаментальных задач, обеспечивают социально-экономические потребности в области связи, телевидения, дистанционного зондирования, экологии, навигации.

Стержнем и венцом перспективной космической деятельности для достижения стратегических целей Человечества являются пилотируемые космические комплексы.

Очередным шагом продвижения в космическое пространство является детальное изучение и освоение планет и их естественных спутников, в первую очередь, Луны и Марса.

На основе полученных на МКС результатов возможна разработка и практическая подготовка конкретных программ пилотируемых экспедиций к Луне и Марсу, поскольку имеется опыт реализации пилотируемых полетов продолжительностью свыше одного года и существуют методики отбора, подготовки и тренировок членов экипажа к таким полетам в сочетании с эффективной системой медицинской поддержки в ходе полета, опирающейся на знания в области физиологии и психологии человека, которые позволяют сохранить состояние здоровья и работоспособность экипажа на должном уровне.

Межпланетные автоматические космические аппараты могут выполнять основные рекогносцировочные исследования при облете небесных тел, посадке и изучению их поверхности, доставке на Землю образцов внеземного вещества.

По имеющимся представлениям мировой научной

общественности, pilotируемой экспедиции на Марс должна предшествовать обширная программа исследований Луны и Марса автоматическими средствами с орбиты и поверхности с целью отработки основных технических решений и конструкций элементов (в т.ч. на орбите ИСЗ и в атмосфере Земли) межпланетного экспедиционного комплекса (МЭК) и, что самое главное, выбора наиболее интересных в научном отношении и безопасных районов посадки, возможно с наличием оазисов предполагаемой внеземной биологической активности.

По мнению ученых и специалистов, при поиске следов внеземной жизни и восстановлении геологической истории планет ни один автомат не заменит биолога с микроскопом и геолога с молотком, поскольку наиболее точным биологическим тестом является рождение, развитие и естественная гибель биологических объектов, а практический опыт геолога в области сравнительной минералогии и петрографии до настоящего времени и, вероятно, в ближайшем будущем не удастся передать автоматическим устройствам из-за возможных ограничений по массе, энергопотреблению и габаритам.

Изучение планет и других небесных тел, кроме достижения перспективных стратегических целей Человечества, может дать конкретную практическую отдачу и в ближайшее время в виде новых эффективных методов поиска полезных ископаемых на больших глубинах, более точных методов долгосрочного прогнозирования погоды, а также выявления фундаментальных закономерностей в области сравнительной планетологии и др.

В связи с этим должна быть, в первую очередь, с единных системных позиций разработана детальная концепция первой межпланетной экспедиции (скоро всего на Марс), количественно обоснованы основные этапы ее реализации, подкрепленные четким и конкретным формулированием целей и задач каждого этапа, а также реальной привязкой к срокам и затратам ресурсов.

В ходе стратегического планирования этой наиболее крупной к настоящему времени научно-технической операции в истории человечества должен быть использован весь арсенал методов системного анализа, опыта разработки и применения больших технических систем для оптимального вложения гигантских объединенных финансовых и материальных ресурсов и рациональной загрузки производственных мощностей большинства развитых государств мирового сообщества.

По уточненному прогнозу развертывания РС МКС в рамках предполагаемой конфигурации МКС предусматривается выведение на РН «Протон» российского многоцелевого лабораторного модуля

(МЛМ) в конце 2007 г., научно-энергетического модуля на многоразовом транспортном космическом корабле «Шаттл» в 2009 г. и российского исследовательского модуля на РН «Протон» в 2010 г. После запуска МЛМ с начала 2008 г. российская сторона будет иметь возможность реализовывать свою программу тремя российскими членами экипажа.

Российская сторона исходит из того, что наряду с решением задач по строительству станции НАСА продолжит выполнять свои обязательства по обеспечению интегрированного экипажа в части его ротации и снабжения необходимыми грузами.

В дальнейшем возможности российского сегмента будут наращиваться посредством использования в его инфраструктуре малых модулей, микроспутников и свободнолетящих обслуживаемых платформ.

Многоцелевую высокосиротную посещаемую космическую станцию предполагается развернуть на орбите после завершения эксплуатации МКС. На ней может быть реализована обширная программа всепогодного круглогодичного мониторинга природных ресурсов, зон природных и техногенных катастроф, экологического состояния различных регионов, а также научно-прикладных исследований в таких областях, как космическое материаловедение, биотехнология, медико-биологические исследования, технические исследования, геофизика, астрофизика.

Реализация МЭК ожидается в период после 2020 г.

1. Анфимов Н. А., Лукьянченко В. И., Синельщиков М. В. и др. Основные результаты предварительного рассмотрения проекта «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на российском сегменте МКС» // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 9—14.
2. Анфимов Н. А., Лукьянченко В. И., Синельщиков М. В., Суворов В. В., Цымбалюк М. М. Современное состояние и перспективы развития работ в обеспечение эффективной реализации совместных российско-украинских экспериментов на РС МКС // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 6—11.

THE PROSPECTS FOR FURTHER DEVELOPMENT OF THE JOINT RUSSIAN-UKRAINIAN PROGRAM OF INVESTIGATIONS AND EXPERIMENTS ABOARD THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

V. I. Lukiaschenko, V. V. Suvorov, M. M. Tsimbaliuk,
T. V. Vasileva, A. V. Golovinkin

A brief review of Russian activities aimed at preparation and implementation of Russian-Ukrainian experiments of the first priority on the Russian Segment of the International Space Station is presented. The paper also addresses some potential areas of further development of joint Russian-Ukrainian research with usage of current and perspective space infrastructures.

© Е. М. Твердохлебова, А. Г. Корсун,
Ф. Ф. Габдуллин, Г. Ф. Карабаджак

ФГУП ЦНИИмашиностроения, Росія

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕННОМ ОКРУЖЕНИИ МКС

Розглядаються властивості електричних розрядів, які можуть запалюватися між елементами Міжнародної космічної станції (МКС) під дією електричного поля високовольтних сонячних батарей (ВВ СБ). Характеристики плазмового оточення станції розраховуються з урахуванням дій на нього іонізуючих потоків у іоносфері, магнітного поля Землі та електричного поля ВВ СБ. Описується постановка космічного експерименту «Плазма-МКС», завданням якого є дослідження параметрів плазмового оточення МКС, що формується при роботі бортових космічних двигунів та інших плазмових джерел, за характеристиками оптичного випромінювання.

ВВЕДЕНИЕ

Электроразрядные процессы в газоплазменном окружении Международной космической станции определяются электрическим полем $\epsilon_B = 160$ В, создаваемым высоковольтными солнечными батареями американского сегмента (AC), и поляризацией $\epsilon_p \approx 20$ В станции при ее движении поперек магнитного поля. Отрицательный полюс ВВ СБ закорочен на корпус МКС, а активная сторона солнечной панели имеет электрический контакт с окружающей плазмой. Поэтому между высоковольтными концами стрингов солнечных панелей и корпусом МКС течет ток утечки из СБ через окружающую плазму, т.е. имеет место слабый электрический разряд.

При обтекании МКС только разреженной ионосферной плазмой этот разряд является несамостоятельный слаботочным. При увеличении плотности окружающей плазмы могут возникнуть различные сильноточные разряды. В данном пространственном электрическом разряде катодом являются все элементы корпуса МКС и часть СБ вблизи ее отрицательного полюса. Анодом служит высоковольтная часть панели СБ. Электрический потенциал в разрядном промежутке распределяется в зависимости от параметров плазменного окружения и от свойств мозаичных, металлокерамических поверхностей анода и катода.

Цель представленной работы состоит в определении параметров плазменного окружения, изменяющихся при работе космических двигателей позиционирования и ориентации (ДПО), плазменных контакторов PCU (Plasma Contactor Unit) и других бортовых источников газа и плазмы.

Ранее выполненные теоретические исследования и расчеты, базирующиеся на пассивном собирании электронов и ионов из окружающей плазмы, дали основание ожидать, что отрицательное смещение потенциала станции относительно окружающей плазмы может достигать -140 В [3]. Это напряжение сосредотачивается в прикатодном, тонком слое вблизи проводящих участков корпуса и на его диэлектрических покрытиях. Величина пробойного напряжения наиболее тонких слоев этого покрытия составляет $80-90$ В [8], поэтому есть опасность пробоев на защитных экранах, приводящих к деградации их характеристик.

Для исключения пробоев на Американском сегменте МКС установлены газоразрядные катоды-компенсаторы — блок PCU. Они создают струю ксеноновой плазмы, через которую происходит сброс отрицательного заряда с корпуса МКС. В результате величина прикатодного падения потенциала удерживается на уровне $\Delta\varphi_c < 40$ В при величине инжектируемого катодом тока до 12 А [7]. Однако при отключении PCU или при значительном изменении плотности окружающей плазмы распределение потенциалов в пространственном разряде может измениться, и величина прикатодного падения возрастет, то есть отрицательное смещение корпуса станции относительно окружающей плазмы резко увеличится.

В течение 2001 года американскими учеными проведена серия экспериментальных исследований параметров окружающей МКС плазмы и величины потенциала поверхности [2, 4]. В частности, установлено следующее.

1. При выключенном PCU и в отсутствие других источников плазмы или газа напряжение «корпус—

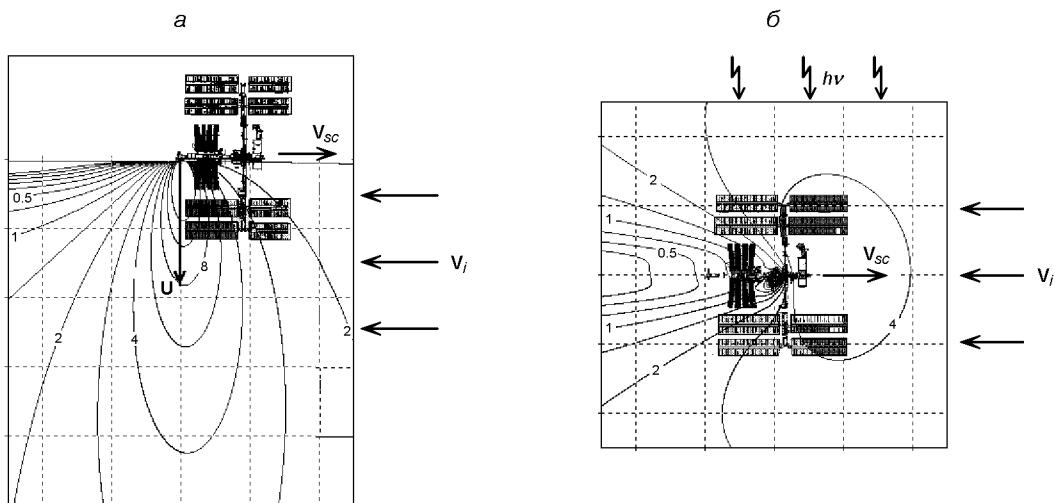


Рис. 1. Модификация СВА под действием набегающей ионосферы: *а* — при работе двигателя ДПО, *б* — под действием УФ-излучения. Числа у кривых — значения n в единицах 10^6 см^{-3} . Соседние изоконцентрали различаются в 1.4 раза

плазма» возрастает незначительно. Для предмета нашего рассмотрения этот факт указывает на то, что, во-первых, в разрядном промежутке происходят эффективные прикатодные процессы сабирания зарядов, а во-вторых, основная разность потенциалов падает в прианодном слое.

2. При работающем блоке PCU ток в цепи PCU—СБ на некоторых участках орбиты возрастает на небольшое время. Это говорит о том, что слабая плазменная струя чутко реагирует на изменение электроразрядной обстановки вокруг станции. Более того, ниже будет показано, что плазменная струя существенно влияет на параметры разряда в пространственной электрической цепи PCU—СБ.

3. На некоторых участках траектории орбитального полета станции при выключенном блоке PCU возникают кратковременные пики потенциала. В предлагаемой работе сделана попытка интерпретировать эти явления и показать доминирующее влияние магнитного поля Земли на электроразрядные процессы в плазменном окружении станции.

ПЛАЗМЕННОЕ ОКРУЖЕНИЕ МКС

Под действием ионизирующих потоков в собственной внешней атмосфере (СВА) станции возникает «собственная ионосфера» с неоднородным распределением плотности ионизованных частиц. В результате вокруг МКС возникают крупномасштабные области пространства как с повышенной, так и

пониженной плотностью плазмы относительно фоновой ионосферы [5].

Основными процессами, которые приводят к образованию «собственной ионосферы» в условиях полета МКС, являются фотоионизация нейтралов СВА излучением Солнца и торможение в СВА набегающего потока ионов атомарного кислорода O^+ . На рис. 1 представлены результаты расчетов распределения электронной концентрации ($n, 10^6 \text{ см}^{-3}$) в «собственной ионосфере» МКС для двух источников:

для струи одного из двигателей ДПО, установленных на служебном модуле МКС и на корабле «Прогресс». Концентрация плазмы в струе работающего двигателя увеличивается под действием набегающего потока ионосферы. На рис. 1, *а* струя ЖРД истекает со скоростью U перпендикулярно к набегающему потоку $n_i V_i$.

для сравнительно плотной СВА станции, возникающей на несколько секунд после кратковременного срабатывания двигателя коррекции. В этом случае на сферически расширяющуюся СВА одновременно воздействует набегающий поток ионосферы и излучение Солнца. Параметры СВА взяты из данных измерений на ОС «Мир» [1]. На рис. 1, *б* поток ионов кислорода набегает со скоростью $V_i = 8 \text{ км/с}$, а УФ-излучение падает под углом $\beta = 90^\circ$ к вектору скорости МКС.

Таким образом, под воздействием энергии Солнца и кинетической энергии КА возникают не очень

плотные, но крупномасштабные плазменные образования.

Видно, что, во-первых, масштаб плазменной неоднородности сопоставим, и даже превосходит размеры МКС, а во-вторых, при возникновении «собственной ионосферы» различные элементы МКС оказываются в различном плазменном окружении. Вблизи некоторых из них концентрация плазмы n много больше, чем в фоновой ионосфере n_0 , а около других, находящихся в зоне тени от газового облака, намного меньше. В сочетании с неоднородным, довольно плотным фоном нейтралов СВА это означает, что зажигание разрядов под воздействием электрических полей высоковольтных солнечных батарей и протекание токов через окружающее пространство будет существенно зависеть от характеристик плазменного окружения.

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Опираясь на результаты проведенных исследований, можно выделить следующие часто реализуемые на МКС электроплазменные процессы.

1. Возникновение плазменного моста между положительно и отрицательно заряженными участками поверхности станции в тех случаях, когда струя ксеноновой плазмы из блока РСУ под действием геомагнитного поля направляется на анодные участки ВВ СБ или на те участки фермы СБ, которые имеют положительный потенциал под действием поляризации.

2. Резкое увеличение тока, собираемого элементами МКС из плазменного окружения, из-за кратковременного повышения плотности СВА при срабатывании двигателей ДПО или других газовыделяющих систем.

3. Появление искровых разрядов на отдельных участках поверхности МКС вследствие увеличения отрицательного потенциала корпуса станции.

На основе трехмерной модели разлета плазменной струи в геомагнитном поле, так называемой Self-Similar Model (SSM) [6], были рассчитаны параметры процесса возникновения плазменного моста.

Суть явления состоит в следующем. РСУ создает сильно расходящуюся струю плазмы с малым расходом $N \sim 10^{18} \text{ с}^{-1}$ и малой скоростью $U = 2...3 \text{ км/с}$ [7]. В такой струе, без учета влияния магнитного поля, концентрация становится меньше фоновой на расстоянии много меньшем, чем расстояние до анода (панели СБ) $L \approx 20...40 \text{ м}$. Согласно SSM-модели под воздействием геомагнитного поля В расширение струи плазмы поперек магнитных силовых

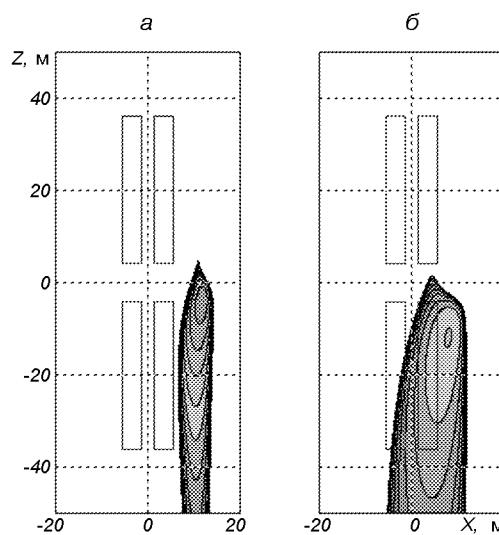


Рис. 2. Сечение плазменной струи РСУ плоскостью панелей СБ при различном направлении магнитного поля Земли. Соседние изоконцентрации различаются в 1.5 раза. Пиковые значения концентраций — порядка $3 \cdot 10^8$ (a) и $0.9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ (b)

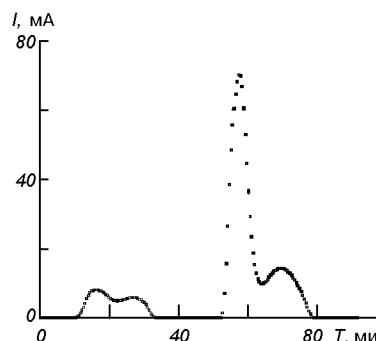


Рис. 3. Изменение величины тока, собираемого панелью СБ при движении МКС

линий сильно ограничено. В результате она приобретает форму тонкого лепестка, плоскость которого определяется вектором скорости струи и направлением геомагнитного поля \mathbf{B} . При движении по орбите ориентация плоскости лепестка относительно станции изменяется. Кратковременно возникает такая конфигурация, при которой плазменный лепесток обтекает активную (анодную) поверхность СБ (или положительно смещенные участки фермы СБ). Тогда плотность плазмы Xe^+ вблизи солнечной панели заметно превышает плотность фоновой, не только спокойной, но и возмущенной ионосферы. В эти моменты времени ток в цепи РСУ возрастает.

На рис. 2 показаны изоконцентрации плазменного лепестка РСУ в плоскости расположения солнечной панели (панель показана контуром) для двух ситу-

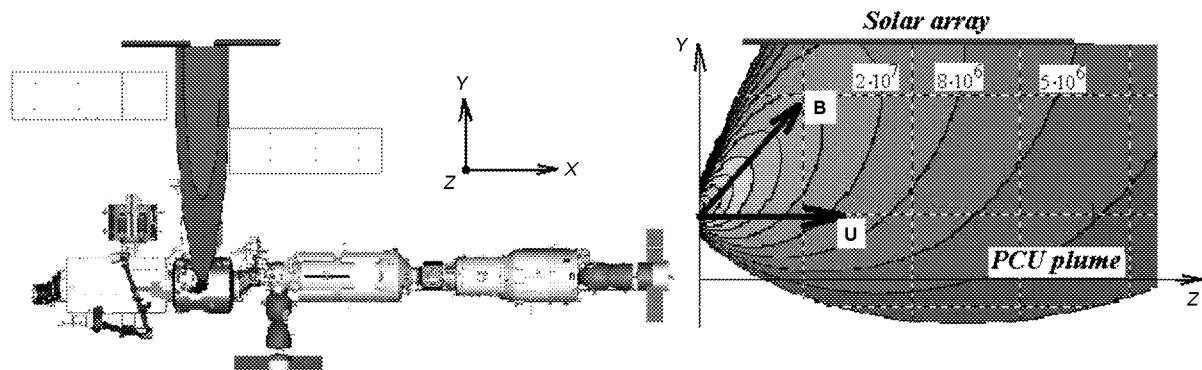


Рис. 4. Возникновение плазменного моста между PCU и панелью СБ

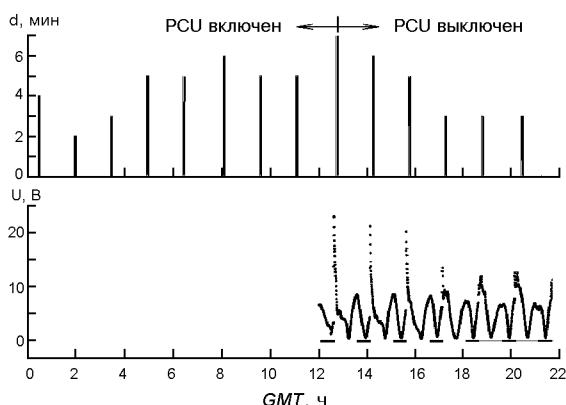


Рис. 5. Сопоставление прогноза методики SPEED для даты 11 апреля 2001 г. (вверху) и результатов эксперимента на МКС [3] (внизу)

фаций в течение одного витка: *a* — магнитное поле «направляет» струю мимо панелей СБ, *б* — солнечная батарея практически вся омывается ксеноновой плазмой PCU.

На рис. 3 представлен результат расчета величины тока, собираемого панелью СБ на этом же витке. Рис. 4 иллюстрирует вид сбоку для взаимного положения плазменной струи и МКС в этот момент времени.

В ходе проведения американскими специалистами экспериментальных измерений 11 апреля 2001 г. сочетание орбитальных, геометрических и светотеневых характеристик было таким, что эффект плазменного моста реализовался редко — только на коротких участках некоторых витков. Если в такой ситуации ни один из катодов PCU не работал, то потенциал станции падал, т. е. величина отрицательного смещения $\Delta\varphi_c$ резко увеличивалась. Для прогнозирования совокупности геофизических и орбитальных условий, при которых следует ожидать усиления электроплазменных процессов

на станции, была разработана методика SPEED (Spacecraft Plasma Environment and Electric Discharge). Эта методика позволяет точно прогнозировать начало и длительность такого события как возникновение «плазменного моста», сопровождающегося заметным изменением тока через катод PCU, или как скачкообразное изменение потенциала станции, если блок PCU отключен. На рис. 5 показаны в сравнении результаты расчета и измерений изменения электроразрядной обстановки на МКС, проведенных американскими специалистами [3].

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ПЛАЗМА-МКС»

Электроразрядные процессы, описанные в предыдущем разделе, сопровождаются усилением интенсивности оптического излучения плазменного окружения. С целью исследования особенностей и интенсивности токовых процессов в плазменном окружении станции от конфигурации МКС и ее положения на орбите, от работы внешних бортовых систем и сезонного изменения внешних космических условий разработан космический эксперимент «Плазма-МКС». КЭ «Плазма-МКС» планируется проводить с имеющейся на борту МКС диагностической аппаратурой — спектрональной системой «Фиалка-МВ-Космос», предназначеннной для получения и регистрации изображений и спектров излучения различного типа электроразрядных процессов, происходящих как на поверхности МКС, так и в плазменном окружении станции. Результаты КЭ позволяют подтвердить справедливость методики SPEED и спрогнозировать величину потенциала поверхности станции в зависимости от влияния различных факторов космического пространства, таких как: геомагнитное поле, солнечное излучение, набегающая ионосфера, потоки ауроральных частиц и удары микрометеоритов.

ВЫВОДЫ

Протекание токов между разноименно заряженными элементами конструкции станции существенно зависит от параметров плазмы в пространстве разрядного промежутка, а также от величины и направления магнитного поля Земли.

Основными источниками, которые определяют электроразрядные условия вокруг МКС, являются струя ксеноновой плазмы катода Plasma Contactor Unit, факелы двигателей позиционирования и ориентации и достаточно плотная собственная внешняя атмосфера станции.

Разработана расчетная методика SPEED, которая позволяет, во-первых, описать пространственное распределение параметров плазменного окружения, формирующегося при работе бортовых космических двигателей и других плазменных или газовых источников, а во-вторых, определить комбинацию геофизических и орбитальных условий, при которых интенсифицируются электроплазменные процессы вокруг МКС. Согласно методике SPEED увеличение плотности плазмы вблизи высоковольтных концов солнечных панелей приведет к увеличению отрицательного смещения потенциала поверхности станции относительно окружающей ионосферы, что в свою очередь может стимулировать возникновение искровых и дуговых разрядов на корпусе МКС.

Результаты расчетов по методике SPEED количественно согласуются с результатами экспериментальных измерений, проведенных американскими учеными.

- Белоцерковский М. Б. и др. Некоторые экспериментальные результаты измерений параметров собственной внешней атмосферы орбитальной станции «Мир» // Космонавтика и ракетостроение.—1996.—№ 17.—С. 148—158.

- Bering E. A., Koontz S., Katz I., et. al. The Plasma Environment of the International Space Station in the Austral Summer Auroral Zone Inferred from Plasma Contactor Data // 40th AIAA ASME. — Reno, 2002.—AIAA-2002-0935.
- Carruth M. R. Jr, Ferguson D., Katz I., Mikaterian R., et. al. ISS and Space Environment Interactions Without Operating Plasma Contactor // 39th AIAA ASME. — Reno, 2001.—AIAA-2001-0401.
- Ferguson D. C., Morton T. L., Hillard G. B.. First Results from the Floating Potential Probe (FPP) on the International Space Station // 39th AIAA ASME. — Reno, 2001.—AIAA-2001-0402.
- Korsun A. G., Gabdullin F. F. Gas-Plasma Non-Uniformity Arising in Gas Releases from Spacecraft under Effect of High-Energy Space Fluxes. — 35th Joint Propulsion Conference, Los Angeles, 1999.-AIAA-99-2122.
- Korsun A. G., Tverdokhlebova E. M., Gabdullin F. F. The Earth's Magnetic Field Effect upon Plasma Plumes Expansion // 25th International Electric Propulsions Conference. — Cleveland, 1997.—IEPC-97-178.
- Patterson M., Verhey T., Soulard G., Zakany J. Space Station Cathode Design, Performance, and Operating Specifications // 25th International Electric Propulsions Conference. — Cleveland, 1997.—IEPC-97-170.
- Schneider T., Carruth M., Hansen H. Minimum Arc Threshold Voltage Experiments on Extravehicular Mobility Unit Samples. // 40th AIAA ASME. — Reno, 2002.—AIAA-2002-1040.

ELECTRIC DISCHARGE PROCESSES IN THE ISS PLASMA ENVIRONMENT

E. M. Tverdokhlebova, A. G. Korsun, F. F. Gabdullin, G. F. Karabazhak

We consider the behaviour of the electric discharges which can be initiated between constructional elements of the International Space Station (ISS) due to the electric field of high-voltaic solar arrays (HVSA). The characteristics of the ISS plasma environment are evaluated taking into account the influence of space ionizing fluxes, the Earth's magnetic field, and the HVSA's electric field. We offer the statement of the space experiment «Plasma-ISS», the aim of which is to investigate, using optical emission characteristics, parameters of the ISS plasma environment formed at operation of both the onboard engines and other plasma sources.

© В. М. Івченко¹, Л. В. Козак¹, Ю. І. Венедиктов²,
О. В. Збруцький³, В. Є. Корепанов⁴, Є. І. Крючков⁵,
Г. В. Лізунов¹, А. А. Лукенюк⁴, А. К. Федоренко⁵

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Спеціальне проектно-конструкторське бюро «Дискрет» Одеського національного політехнічного університету, Одеса

³Національний технічний університет України (КПІ), Київ

⁴Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ

⁵Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ, Київ

ПРОЕКТ «ГЕОКОСМОС» ДЛЯ УКРАЇНСЬКОГО МОЛОДІЖНОГО СУПУТНИКА

Подано опис наукового експерименту, запропонованого для Українського молодіжного супутника (УМС), створення та запуск якого передбачені Національною космічною програмою України на 2003–2007 роки. Метою проекту є фундаментальні дослідження з фізики іоносфери, а також розробка методів моніторингу поверхні Землі та навколоземного простору. Новизна проекту полягає у використанні мікросупутника для вивчення іоносферного відгуку на природні і техногенні впливи знизу (екологічний моніторинг). Запропонований комплекс бортової апаратури УМС включає в себе давачі електромагнітних полів і частинок в іоносфері, а також телевізійну і спектрометричну апаратуру для спостереження як за погодними структурами (циклонами, фронтальними зонами), так і збуреннями на земній/водній поверхні. Даний комплекс приладів може бути використаний не лише для розв'язання наукових задач проекту, а також і для ДЗЗ. Більшість приладів мають прототипи, розроблені для проектів «Інтербол», «Попередження», «Варіант».

ВСТУП

15 січня 2004 року Національним космічним агентством України був оголошений конкурс проектів для Українського молодіжного супутника (УМС), на який подано проект «Террагенні ефекти в іоносфері» (шифр «Геокосмос»). Метою цього проекту є фундаментальні дослідження з фізики іоносфери, а також розробка методів моніторингу поверхні Землі та навколоzemного космічного простору.

У той час як іоносферні збурення, обумовлені сонячною та геомагнітною активністю, досліджуються вже кілька десятків років в рамках програм з сонячно-земних зв'язків та космічної погоди, значно менше уваги приділяється дослідженню впливів на іоносферу «знизу». В результаті в цій галузі космічних досліджень залишається малорозвиненим цілий науковий напрям, причому Україна в цьому напрямі має чималий науково-технічний доробок (теоретичні, експериментальні та інженерні розробки в рамках проектів «Попередження», «Варіант», «Інтербол-Прогноз»). Ми пропонуємо використати ситуацію, що склалася, для того, щоб надати експериментам на борту УМС, з одного боку, обґрунтованості, з іншого — оригінальності. Основна ідея пропонованого проекту — викори-

стання мікросупутника для прямої реєстрації іоносферного відгуку на природні і техногенні впливи знизу.

Слід відзначити, що моніторинг електромагнітних параметрів геокосмосу є актуальним з точки зору реалізації програм космічної погоди та GMES, що, в свою чергу, є важливим для залучення українських молодих вчених у міжнародну наукову кооперацію. Також слід відзначити екологічну спрямованість проекту. Деякі практичні задачі виявлення небезпечних і катастрофічних явищ на поверхні Землі традиційно розв'язуються з використанням методів ДЗЗ. Менше вивчені можливості використання для цього специфічно іоносферних спостережень, наприклад виявлення іоносферних провісників землетрусів.

Конкретні завдання проекту включають:

- вимірювання тонкої структури електромагнітних полів і варіацій концентрації плазми вздовж орбіти супутника;
- спостереження за погодними системами і спектральними параметрами земної поверхні під супутником;
- кореляційний аналіз зв'язку іоносферних збурень з метеорологічною і сейсмічною активністю;

— розробка освітньої програми для студентів та школярів.

Всі ці задачі — реєстрація явищ на поверхні Землі та в нижній атмосфері, виявлення іоносферного відгуку, осмислення одержаних даних, екологічний моніторинг — є не лише актуальними, але й зрозумілими та цікавими задачами для нового покоління науковців та інженерів.

НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Ми розглядаємо іоносферу як специфічну оболонку Землі, чутливу до впливів згори і знизу. Впливи згори викликані, як правило, сонячною активністю і призводять до складного комплексу іоносферно-магнітосферних збурень. Впливи знизу пов'язані з коливаннями, що генеруються в розташованій нижче нейтральній атмосфері [8]. Оскільки основна енергетика атмосфери зосереджена в руках нижчих, найщільніших шарів, потужними джерелами атмосферних хвиль, які досягають іоносферних висот, є метеорологічні і сейсмічні процеси (циклони, струменеві течії, виверження вулканів, сильні землетруси), а також техногенні вибухи і старти ракет [3].

Впливи на іоносферу «зверху» широко досліджуються уже декілька десятиліть в рамках програм зі сонячно-земних зв'язків і тепер з космічної погоди. Впливи «знизу» досліджені менше через значні технічні та методологічні проблеми реєстрації неоднорідностей нейтральної атмосфери на іоносферних висотах та ідентифікації їхніх джерел. Річ у тому, що дистанційні методи діагностики іоносфери не дають прямої інформації про збурення нейтрального газу: реєструються не самі атмосферні хвилі, а їхні плазмові прояви — рухливі іоносферні збурення (РІЗ), інтерпретація яких неоднозначна. Інша складність пов'язана з ідентифікацією джерел збурень. Переважна частина даних про генерацію РІЗ атмосферними хвильами була отримана в експериментах з ядерними вибухами [6, 4, 9].

Ще одна причина інтересу до атмосферних хвиль як агента, що виносить енергію з нижніх шарів атмосфери вгору, пов'язана з проблемою іоносферних провісників землетрусів. Фізика та умови виникнення іоносферних збурень над ділянкою підготовки землетрусу незрозумілі. Незважаючи на велику кількість спостережень, недостатньо таких експериментальних даних, які дали б змогу визначити хоча б фізичний механізм, відповідальний за «проекцію» літосферних процесів підготовки землетрусу на іоносферу [1]. Гіпотеза про зв'язок іоносферних провісників землетрусів з коливаннями

нейтральної атмосфери, що викликаються термічними аномаліями земної поверхні [10, 11], була вперше запропонована Гохбергом та ін. [7].

Термін «атмосферна гравітаційна хвиля» (АГХ) чи «внутрішня гравітаційна хвиля» використовується нами для позначення однієї із дисперсійних гілок атмосферних хвиль.Період АГХ складає приблизно від 6 хв до 10 год, довжина хвилі — від десятків метрів до декількох тисяч кілометрів. На шкалі частот гравітаційна мода атмосферних хвиль знаходитьться поряд з низькочастотними планетарними і високочастотними акустичними модами. Всі ці хвилі — акустичні, гравітаційні, планетарні — відіграють свою роль в динаміці атмосфери. Акустичні хвилі найбільш швидкі і утворюють передній фронт збурень, які досягають іоносфери при землетрусах і вибухах [5]. При цьому енергетичний вплив на іоносферу акустичних хвиль невеликий через сильну дисипацію звуку з висотою. Значно більший потік енергії пов'язаний з планетарними хвилями, відповідальними за формування великомасштабних довгоперіодичних іоносферних неоднорідностей [2]. Однак через їхню малу швидкість транспорт енергії планетарними хвилями займає тижні і місяці. Атмосферні гравітаційні хвилі забезпечують не тільки енергетично ефективний, але і «швидкий» динамічний зв'язок нижньої атмосфери з іоносферою. В цьому процесі важливу роль відіграють АГХ з довжинами порядку 100...200 км, фазовими і груповими швидкостями 100...200 м/с. Головна мета пропонованого супутникового проекту полягає у прямому вимірюванні з борта УМС іоносферних збурень, викликаних АГХ від тропосферних і поверхневих джерел.

Комплекс бортової апаратури УМС, необхідний для розв'язання цієї задачі, повинен включати в себе давачі електромагнітних полів і частинок в іоносфері, а також фотометричну (телевізійну) апаратуру для спостереження за наземними джерелами збурень. Слід зазначити, що даний комплекс приладів може бути використаний не лише для розв'язання наукових задач проекту, але й для проведення «стандартних» геофізичних вимірювань і ДЗЗ. Крім того, великий інтерес представляє застосування високоточних наукових давачів для відпрацювання методів орієнтації і визначення координат КА.

МОДЕЛЬНИЙ СКЛАД КНА ТА ОРБІТА СУПУТНИКА

Виходячи з визначених вище задач і реальних можливостей комплектації мікросупутника, можна запропонувати наступний модельний склад корис-

Таблиця 1. Склад КНА

Давач	Вимірювана величина	Технічні характеристики	Розробник
Індукційний магнітометр	Компоненти магнітного поля B_X , B_Y Діапазон частот 0.1 Гц — 100 кГц Шум 10^{-13} Тл/Гц ^{1/2}	Споживана потужність менше 0.16 Вт; маса 170 г	А. Марусенков (ЛЦ ІКД)
Електричний зонд	Потенціали електричного поля в двох точках φ_1 , φ_2 Діапазон частот 0.1 Гц—200 кГц Шум мкВ/Гц ^{1/2}	Маса: 140 г, Споживана потужність 0.1 Вт	А. Сухенюк (ЛЦ ІКД)
Давач холодної плазми «Альфа-5»	Концентрація іонів в іоносферній плазмі — 10^2 — 10^6 см ⁻³ ; температура іонного компонента 0.2—5 еВ;	Споживана потужність < 1 Вт; маса 1.5 кг	Ю. Венедиктов (СПКБ «Дискрет»)
Ферозондовий магнітометр	Вектор магнітного поля B . Діапазон частот DC — 0.5 Гц	Споживана потужність 0.63 Вт; маса 0.7 кг	С. Беляєв (ЛЦ ІКД)
ПЗЗ камера видимого та ІЧ-діапазону з інтерференційним спектральним приладом	Зображення ділянок земної поверхні і атмосфери з роздільною здатністю 0.1 км. Вимірювання потоку випромінювання в спектральних інтервалах ≈ 1 нм	Споживана потужність 3 Вт; маса 3.2 кг	В. Лапчук (КНУ)
Бортова система збору інформації	Вимоги до СЗН будуть визначені за інформаційними характеристиками приладів та науковою програмою експериментів	Маса < 2 кг Споживана потужність < 8 Вт Габаритні розміри: 80×140×145 мм	А. Лукенюк (ЛЦ ІКД, «Львівська Політехніка»)

ного навантаження УМС: плазмо-хвильовий комплекс; комплекс апаратури ДЗЗ; СЗНІ.

Плазмо-хвильовий комплекс повинен включати:

1. Трикомпонентний давач геомагнітного поля. Мета — вимірювання вектора магнітного поля Землі, орієнтація КА.
2. Двокомпонентний давач змінного магнітного поля. Ділянка частот 0.01—100 Гц, динамічний діапазон 0.01—1000 нТл. Мета — вимірювання хвильової форми плазмових збурень, що генеруються АГХ в іоносфері, і альвенівських хвильових структур магнітосферного походження.
3. Однокомпонентний давач напруженості електричного поля. Мета — вимірювання хвильових форм електромагнітних сигналів в діапазоні частот 0.1 Гц — 1 кГц і форми спектру в діапазоні до 100 кГц. Частотний діапазон 1—100 кГц включає в себе ділянку іонних циклотронних резонансів, іонного звуку і вістлерів, реєстрація яких даст зможу отримати інформацію про спектр низькочастотної турбулентності плазми і відслідковувати склад основних іонних компонентів. З використанням зонда електричного поля також будуть детектуватися КНЧ- та ДНЧ-емісії природного і техногенного походження.

4. Давач фонової плазми для вимірювання концентрації основних іонів, електронної та іонної температури. Роздільне визначення електронної та іонної температур необхідне для інтерпретації спектру плазмових хвиль.
5. Приймач GPS-сигналів, що входить до складу службової системи мікросупутника, дані якого після наземної обробки будуть використані для інтерпретації іоносферних вимірювань. Так, оцінка за-

гальних характеристик верхньої атмосфери вздовж орбіти супутника може бути здійснена шляхом точного вимірювання параметрів його орбіти. При точності визначення координат не гірше кількох метрів, спостереження за процесом гальмування мікросупутника дозволить оцінити густину верхньої атмосфери, а також дослідити характер її широтних і добових варіацій. Зіставлення даних бортового і наземних GPS-приймачів (експеримент з радіопросвічування) дозволить детектувати великомасштабні плазмові неоднорідності.

Комплекс ДЗЗ включає в себе спектрометр та фотокамеру (напрямок в надир) для спостереження за погодними структурами під супутником (циклонів, фронтальних зон), збуреннями на земній/водній поверхні.

Запропонований перелік наукових інструментів є мінімально достатнім. Його можна скоротити, але реалізація пропозицій щодо складу КНА у повному обсязі значно підвищить можливості проекту. Для розв'язання наукових задач даного проекту найбільше підходить полярна кругова орбіта супутника. Така орбіта забезпечить покриття всієї поверхні Земної кулі та перетин основних морфологічних зон іоносфери: полярних шапок, авроральних овалів, ділянки проекції каспу на іоносферу та ін. На певних витках УМС буде проходити над нагрівними стендаами (потужними КХ-передавачами), що даст можливість проведення комбінованих експериментів з нагріванням іоносфери та реєстрацією ефекту безпосередньо з борту супутника. Особливий інтерес викликають експерименти із впливу на авроральну іоносферу потужного нагрівного комплексу Європейської іоносферної асоціації EISCAT (Тромсе, Норвегія). Крім того, на момент запуску

Таблиця 2. Учасники проекту

Організація-учасник	Вклад в проект
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (КНУ)	Загальна координація робіт Розробка освітньої програми для студентів Виготовлення ПЗЗ камери
Львівський національний університет «Львівська Політехніка», ЛЦ ІКД	Розробка та виготовлення СЗНІ
Львівський центр інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ (ЛЦ ІКД)	Виготовлення плазмового хвильового комплексу
СПКБ «Дискрет» Одеського національного політехнічного університету	Виготовлення давача холодної плазми
Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ (ІКД)	Розробка циклограм вимірювань. Наземний сегмент збору інформації
НАЦ КТНП при національному технічному університеті України (КПІ)	Відпрацювання методів орієнтації і навігації КА

УМС буде завершено будівництво першої черги надпотужного нагрівного КХ-комплексу в Гаконі (Аляска, США). Також є цікавими експерименти щодо впливу на іоносферу нагрівного стенду Радіоастрономічного інституту НАНУ (м. Харків) та акустичного джерела ЛЦ ІКД НАНУ-НКАУ (м. Львів).

Всі вказани експерименти є актуальними не тільки з точки зору наукових задач даного проекту, але і традиційних геофізичних вимірювань і ДЗЗ. Самостійний інтерес має задача використання високоточних наукових давачів для відпрацювання методів орієнтації і навігації КА. Автори вважають, що пропонований проект може значною мірою задовільнити і заявки інших авторів за напрямами (1) «наукові космічні дослідження», (2) «спостереження Землі з космосу», (3) «системи стабілізації і орієнтування», (5) «освітні проекти за тематикою досліджень УМС».

Перелік наукових приладів, які пропонуються для УМС, подано в табл. 1. Майже всі вони мають прототипи, створені для проектів «Інтербол», «Попередження», «Варіант». Прилади, виготовлені в ЛЦ ІКД, успішно функціонували в експериментах на КА «Інтербол-1, -2» та на станції «Мир».

Розподіл обов'язків між учасниками проекту наведено в табл. 2.

ВИСНОВКИ

Національна космічна програма України передбачає запуск молодіжного мікросупутника орієнтовно в 2006 році. Ми пропонуємо здійснити на борту

серію експериментів з реєстрації тонкої структури електромагнітних полів і варіації плазми в іоносфері, а також досліджувати зв'язок цих варіацій з погодними системами і потужними (катастрофічними) явищами на поверхні Землі. Успішна реалізація проекту буде сприяти не тільки прогресу в галузі фундаментальних космічних досліджень, але і поглиблений кооперації українських дослідницьких колективів з міжнародним науковим співтовариством.

Роботу виконано при підтримці контракту з НКАУ № 8-6/02.

1. Гримальський В. В., Івченко В. Н., Лизунов Г. В. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений // Космична наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 21—30.
2. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987.—271 с.
3. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космична наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 38—47.
4. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmospheric and Terrestrial Phys.—1975.—37.—P. 1011—1054.
5. Galperin Yu. I., Hayakawa M. On the magnetospheric effects of experimental ground explosions observed from AUREOL-3 // J. Geomag. Geoelectr.—1996.—48.—P. 1241—1263.
6. Georges T. M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances // J. Atmospheric and Terrestrial Phys.—1968.—30.—P. 735—746.
7. Gokhberg M. B., Nekrasov A. K., Shalimov S. L. A new approach to the problem of lithosphere-ionosphere coupling before the earthquake // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction / Ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. — Tokyo, TERRAPUB, 1994.—P. 619—626.
8. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys.—1960.—38.—P. 1441—1481.
9. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. Geophys.—1996.—14.—P. 917—940.
10. Tronin A. A. Satellite thermal survey application for earthquake prediction // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. — Tokyo, TERRAPUB, 1999.—P. 717—746.
11. Tronin A. A. Atmosphere-lithosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. by M. Hayakawa and O. A. Molchanov. — Tokyo, TERRAPUB, 2002.—P. 173—176.

THE GEOCOSMOS PROJECT FOR THE UKRAINIAN JUNIOR SATELLITE

V. M. Ivchenko, L. V. Kozak, Yu. I. Venedyktov,
O. V. Zbrutskyi, V. Ye. Korepanov, Ye. I. Kriuchkov,
G. V. Lizunov, A. A. Lukeniuk, A. K. Fedorenko

A project of scientific experiments onboard the Ukrainian Junior Satellite (UJS) is proposed. The UJS creation and launch are provided in accordance with the National Space Program of Ukraine

for 2003–2007. The purpose of our project is fundamental researches in field of ionospheric physics and the elaboration of some methods for near-Earth space monitoring. Novelty in the project is the use of UJS for the direct detection of ionosphere response to natural and man-caused influences from below (ecological monitoring). The proposed complex of devices onboard UJS includes electromagnetic field and ionosphere-particle detectors and also TV

and spectrometer devices for observations of both meteorological structures (cyclones, frontal zones) and disturbances on ground/water surfaces. The complex of devices under consideration can be used not only for solving scientific problems of the project but also for carrying out the Earth remote sensing. Most of the devices have their prototypes worked out for the projects «Interball», «Prediction», and «Variant».

© А. П. Видъмаченко, О. В. Мороженко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

КАРТИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛУНЫ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ С ОРБИТАЛЬНОЙ ЛУННОЙ СТАНЦИИ

Наземні і космічні дослідження Місяця дозволили виконати крупномасштабне приблизне картування його поверхневого шару. Морфологічні деталі Місяця мають різні спектральні відбивні властивості. Їхньою характерною рисовою є зменшення відбивної здатності при переході від візуальної до УФ-ділянки спектру і наявність смуг поглинання в IЧ-ділянці спектру. Це дозволяє говорити про мінералогію поверхні Місяця. Різні морфологічні утворення поляризують світло по-різному. Значення ступеня поляризації багатьох деталей на Місяці в довгохвильовій області спектру практично однакові, але в ультрафіолетовій сильно відрізняються. Фазова крива в ультрафіолеті дозволяє визначити величину фазового кута α_{\max} , при котрому має місце максимальне значення ступеня поляризації P_{\max} , з похибкою, меншою від 1° . Знання цих оптических параметрів поверхні дозволяє визначити показники заломлення мінеральних часток, тобто виконати картографування мінералів на Місяці.

Введение. Есть много свидетельств в пользу гипотезы, что именно гигантское воздействие на раннюю Землю создало Луну и что на молодой Луне был океан магмы. Последующее ее охлаждение и кристаллизация привели к образованию верхней части первоначальной коры Луны. В связи с практическим отсутствием атмосферы на нашем естественном спутнике возникает необходимость ответить на ряд вопросов: сколько из этой первичной коры «выжило» до настоящего времени? Она была полностью разрушена, или некоторые ее части остаются относительно неизменными? Какие минералы и где именно расположены на поверхности и, если возможно, то и под видимой поверхностью? и т. п. [1]. Наземные исследования и тщательные исследования с помощью космических аппаратов к настоящему времени позволили выполнить только довольно крупномасштабное и очень приблизительное картографирование поверхного слоя нашего спутника. То есть, кроме чисто астрофизических исследований на повестку дня встают народнохозайственные проблемы. Первостепенной задачей становится минералогическое картирование тел Солнечной системы, и в первую очередь Луны. Для повышения точности измерений и для лучшей детализации по поверхности спутника необходимо выполнять основанное на анализе оптических свойств отраженного

излучения дистанционное картирование с небольшого расстояния от объекта исследований, и, лучше всего, с орбитального модуля, обращающегося по круговой орбите. Рассмотрим ниже возможные пути повышения достоверности получаемых результатов, касающегося картирования физических характеристик поверхного слоя Луны.

Земные минералы и их характеристики. Минерал — это однородное твердое или жидкое неорганическое произведение природы определенного химического состава, входящего в состав твердой оболочки Земли и/или других небесных тел. Падавляющее большинство минералов представляют тела твердые, и только самородная ртуть, вода и нефть — жидкости. Наибольшее распространение получили силикаты, содержащие в основании щелочи, известняк, магнезию, глинозем и окислы железа. Такова, например, группа полевых шпатов, слюд, хлоритов, роговых обманок и авгитов. За ними следуют окислы, водные и безводные (кварц со многочисленными видоизменениями и окислы железа, такие как красный железняк, магнитный железняк, бурый железняк и др.). Весьма распространены углекислые соединения, такие как кальцит и доломит, и некоторые представители сернистых соединений, например пирит; сернокислых — гипс; галоидных — каменная соль. Другие

минералы встречаются на земном шаре только в немногих местностях. Примером могут служить: самородная платина, осмистый иридий и иридистый осмий, диоптаз, киноварь, самородная ртуть и др.

Большинство минералов в химическом отношении представляет тела сложные, состоящие обычно из небольшого числа элементов. Некоторые же являются простыми или вообще отдельными химическими элементами, которые в таком случае называются самородными: таковы самородные металлы золото, платина, серебро, ртуть, медь; самородные металлоиды сера, углерод (графит и алмаз). Минералы сложного состава представляют те же типы, которые приняты в химии для всех соединений вообще.

Есть также различные типы гидратов и солей. Большинство же минералов имеют солеобразный характер, являясь солями различных кремневых кислот, серной, угольной, фосфорной, хромовой и др. Вследствие этого общий состав таких минералов оказывается весьма сложным. Сложность обуславливается и другими причинами, например включениями одного минерала в другом, различного рода химическими изменениями, происходящими под влиянием атмосферы или же различных растворов и пр. Большая часть минералов принадлежит телам кристаллическим, немногие же из них являются аморфными (например, опалы, палит). В одних случаях в природных условиях известны только мелкие кристаллики (например, кристаллы каолинита в виде весьма мелких чешуек и листочеков, кристаллики платины, золота в виде зерен и пр.), в других же минералы отличаются способностью кристаллизоваться в более совершенных формах, достигающих иногда огромных размеров.

По своему происхождению минералы делятся на первичные и вторичные. Первыми называют такие, которые произошли непосредственным выделением из раствора, расплавленной массы или из парообразного состояния (при испарении морской воды: гипс, каменная соль и др.; при остывании лав: оливин, санидин, аортит; при возгонке по трещинам и в кратерах вулканов — сера, хлористый натрий). Вторичными называют такие, которые образовались вследствие разрушения и изменения первичных минералов или под влиянием атмосферы, или подземных водных растворов, или действием расплавленных масс, или паров и газов, или же, наконец, под влиянием одного давления и высокой температуры.

Физические свойства минералов весьма разнообразны. Для их характеристики большей частью пользуются цветом, блеском, прозрачностью, твердостью, тягучестью, изломом, спайностью и удель-

ным весом. По цвету минералы разделяются на цветные и окрашенные. Цветными называют такие, у которых окраска зависит от цвета вещества, составляющего минерал (например, малахит: его зеленый цвет зависит от основной углекислой меди, из которой малахит и состоит; уваровит или хромистый гранат: зеленый цвет его зависит от известково-хромистого силиката, из которого он состоит и пр.) Окрашенными называют минералы, цвет которых зависит от примесей, иногда ничтожно малых. Примером могут служить окрашенные разновидности кварца: аметист, цитрин, морион; разновидности корунда: сапфир, рубин, восточный изумруд и пр., топаз, циркона и многих других. Минерал, не имеющий никакой окраски и прозрачный, называется бесцветным.

По способности пропускать световые лучи минералы делятся на прозрачные, полупрозрачные, пропускающие, просвечивающие в краях и непрозрачные.

Количество минералов и их распространенность. До 1800 года было известно менее 100 самостоятельных минеральных видов; в последующие годы темп открытия новых минералов непрерывно растет.

Среди установленных на Земле 4000 минералов всего лишь 20—30 минералов (главнейшие из которых — кварц, полевой шпат и роговая обманка) составляют 99.5 % земной коры, а остальные встречаются относительно редко. При этом большая часть известных минералов образуется в приповерхностных слоях, примерно 200 являются продуктами глубинных магматических процессов, а около 1000 связано с химическими реакциями, в которых участвуют нагретые подземные воды (гидротермальные растворы).

Количество минералов на Луне. Из более 4000 известных на Земле минералов только 89 минералов найдено на Луне. Такое численное превосходство земных минералов над лунными связано с тем, что масса лунных пород, доставленных на Землю двумя российскими космическими кораблями «Луна» и шестью американскими кораблями «Аполлон», не превышает 380 кг. Это относительно немного, поскольку число минералов растет пропорционально анализируемой массе и площади, с которой они собраны.

Важным фактором, ограничивающим разнообразие лунных минералов, является отсутствие воды в химическом составе Луны. До сих пор на Луне не установлено водосодержащих минералов, и лишь в одном — гетите FeOOH есть гидроксильные группы. Тогда как примерно для половины известных на Земле минералов, характерно участие в их

составе молекул воды и OH-групп. Так, к водосодержащим минералам относятся около 75 % фосфатов, 65 % карбонатов и 50 % силикатов.

Спектральные дистанционные исследования Луны. На первый взгляд Луна кажется бесцветным скалистым и безводным планетарным телом. Однако цветовые различия все же составляют выходящие за пределы ошибок наблюдений несколько процентов отклонения от распределения солнечной радиации по спектру, а в некоторых длинах волн отличия могут превышать и 10 % (например, в полосе поглощения пироксена).

В общем случае поверхностный слой характеризуется физическими свойствами вещества, т. е. спектральными значениями комплексного показателя преломления $m(\lambda) = n_r(\lambda) - i n_i(\lambda)$, микроструктурой поверхностного слоя и функцией распределения неровностей по размерам. Здесь $n_r(\lambda)$, $n_i(\lambda)$) — действительная и мнимая части показателя преломления. Солнечный свет, упавший на такую поверхность, частично поглощается, преломляется и отражается. В общем виде диффузно отраженное излучение полностью описывается четырьмя параметрами Стокса $\{I, Q, U, V\}$, являющимися функциями угла фазы α , углов падения и отражения света. В принципе вся информация о физических и структурных характеристиках поверхностного слоя закодирована в этих четырех параметрах. Параметр F характеризует интенсивность диффузно-отраженного излучения, которая определяется значениями альбедо однократного рассеяния ω и индикатрисой рассеяния $\chi(a)$. Альбедо частиц определяется в первую очередь величиной мнимой части показателя преломления, размером неровностей и очень слабо зависит от величины $n_r(\lambda)$. В случае поверхностного слоя отсутствует дифракция Фраунгофера, поэтому даже для крупных частиц предельным минимальным значением будет не $\omega = 0.5$, как это имеет место для атмосферного аэрозоля, а $\omega = 0$. Спектральная зависимость альбедо частиц характеризует спектральные изменения величины $n_i(\lambda)$ и безразмерного параметра $\rho = 2\pi r/\lambda$. Здесь r — размер неровности. Поэтому даже в идеальном случае, когда $n_i(\lambda) = \text{const}$, ω будет уменьшаться с уменьшением длины волны из-за увеличения ρ . Это приведет к тому, что отражательная способность шероховатой поверхности даже с не зависящими от длины волны физическими свойствами будет уменьшаться к УФ-концу спектра. Вид индикатрисы рассеяния определяется в основном размером неровностей, их формой и значением показателя преломления.

При рассеянии света в поверхностном слое часть

света выходит из слоя непосредственно после первого акта соприкосновения с неровностью (однократное отражение), а часть света покидает слой только после взаимодействия с двумя или большим числом частиц (многократное рассеяние). Так как интенсивность многократно рассеянного излучения нелинейно зависит от ω , то ее относительный вклад будет больше в той области спектра, для которой больше ω , т. е. в видимых и красных лучах. Кроме того, интенсивность однократно и многократно рассеянного излучения по-разному зависит от углов падения и отражения света, а также от угла фазы. Так как альбедо однократного рассеяния реальных минералов зависит от длины волны, то влияние многократного рассеяния приведет к изменению показателя цвета с углом фазы. Перечисленные качественные рассуждения подтверждаются имеющимися спектрофотометрическими наблюдениями Луны и земных образцов.

Морфологические детали Луны имеют различные спектральные отражательные свойства. Общей характерной чертой является уменьшение отражательной способности к УФ-лучам и наличие в длинноволновой области спектра депрессий, совпадающих с полосами поглощения тех или иных минералов (см. рис. 1) [2].

Лабораторные измерения показали также, что интенсивность отраженного излучения уменьшается с увеличением размера неровностей, при этом также уменьшается остаточная интенсивность R полос поглощения в ближнем ИК-участке спектра.

Из изучения лунных образцов с возвращаемых автоматических станций и пилотируемых кораблей

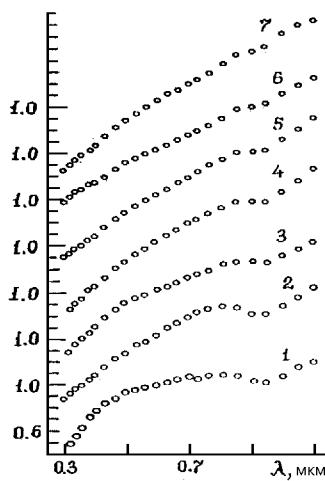


Рис. 1. Спектральная зависимость относительной отражательной способности лунных деталей, нормированной на $\lambda = 0.57$ мкм: 1 — Аристарх, 2 — Море Хуморум 45, 3 — Тихо 1, 4 — Море Фрикорис 1, 5 — Море Серенитатис 2, 6 — Море Транкулитатис, 7 — Море Хуморум 41)

мы знаем, что полезные лунные ископаемые имеют все диагностические спектральные свойства, замеченные и в земных материалах, но без огромного дополнительного влияния воды и растительности. Такие исследования позволили выполнить их приблизительную идентификацию и нанести на соответствующие карты. Для этого использовался дистанционный спектроскопический метод изучения основных минералов на Луне: базальты, нориты, габбро, анортозиты, троктолиты (возможно данные), и ряд минералов со смешанной литологией.

Большинство поверхности Луны покрыто хорошо развитой почвой, которая включает и ряд других компонентов, характерных для данной местности. Именно отличие спектральных оптических свойств лунных почв помогают характеризовать лунные грунты. Данные космического аппарата «Клементина» в пяти цветах, выделяемых отдельными широкополосными светофильтрами, хотя и с низким спектральным разрешением, но обеспечили беспрецедентные по охвату поверхности естественного спутника Земли карты глобальных лунных цветовых вариаций. Хотя, конечно, они имеют все же довольно приблизительные указания на минералогический состав поверхности Луны.

Например, огромное до 2500 км в диаметре море Aitken возле южного полюса на обратной стороне Луны, является аномальным по своему геологическому строению. Он один из двух самых старых участков на лунной поверхности. В отличие от меньших бассейнов на обращенной к Земле стороне, вышеуказанное образование по какой-то причине практически не было заполнено базальтами, но ее поверхность обогащена полезными ископаемыми, включающими в себя железо, большинство которых пористые по своей природе. Полагают, что подобный материал обычно залегает в более глубоких слоях [6]. Это остаточное железо является антикоррелированным с возрастом исследуемого участка. Оказалось, что более «взрослые» темные моря содержат меньше оливина. Поэтому наиболее вероятная интерпретация имеющихся на сегодня данных связана с тем, что железо является остатком распада оливина [8].

На 1.5-м телескопе обсерватории Сьерра-Невады (Гранада, Испания) в 96 спектральных полосах диапазона $\lambda\lambda = 0.4...1.0$ мкм, были получены изображения двух темных областей на Луне, Rima Bode и Sinus Aestuum, а также расположенных рядом областей горной гряды [7]. С использованием новых статистических методов обработки этих изображений удалось не только отличить горные и равнинные области, но и идентифицировать некоторые участки равнинной поверхности, на которых

наблюдалось смешивание грунтов лунных морей с горными почвами. Особенно контрастно спектры темных равнинных регионов отличаются от спектров горных участков, что может помочь лучшему пониманию возможного развития лавовых извержений, которые и привели к имеющемуся на сегодня месторасположению геологических структур. Неоцененным при этом является сравнительный анализ дистанционного изучения лунной горной местности совместно с анализом лунных материалов, возвращенных автоматическими станциями и пилотируемыми аппаратами из известных местоположений на поверхности Луны. Именно ои и позволил намного более определенно говорить об истинной литологии во многих местах на Луне.

Таким образом спектральные исследования лунной поверхности дистанционными методами позволяют (хотя и довольно грубо) говорить о минералогии поверхности Луны.

Поляризационные исследования Луны. При угле падения света на поверхность диэлектрика (минерала), отличном от нуля, отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными. В отраженном лучепреобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения. В преломленном луче преобладают колебания, параллельные плоскости падения. Степень поляризации зависит от угла падения. Если тангенс угла падения равен относительному показателю преломления n двух сред ($\operatorname{tg}\alpha_b = n$), то преломленный луч полностью поляризован в плоскости, совпадающей с плоскостью падения (закон Брюстера). При этом отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

Для гладких поверхностей (неровности много меньше длины волны) законы отражения и преломления хорошо изучены и описаны формулами Френеля. При отражении света различают две поляризации: S-поляризация, при которой вектор E перпендикулярен к плоскости падения, P-поляризация, при которой вектор H перпендикулярен к плоскости падения. Расчеты показывают, что при нормальном падении света ($\alpha = 0$) коэффициенты отражения и S- и P-поляризации равны, и степень поляризации волны не изменяется. Для стекла при угле $\alpha = 57^\circ$ (угол Брюстера) коэффициент отражения для P-поляризации равен нулю, отражается только S-поляризация, и свет полностью поляризован.

Поверхность Луны — яркий пример поверхности безатмосферных космических тел, состоящих из минералов в разных физико-химических состояниях. Лунные образования, различные по морфологическим и физическим свойствам, поляризуют свет по-разному. Кварцхелия [1] выполнил многочис-

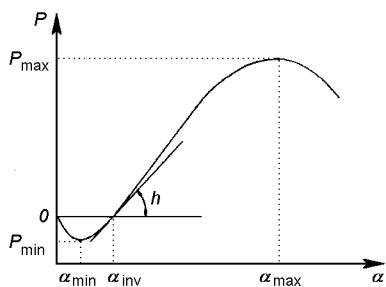


Рис. 2. Параметры фазовой кривой шероховатой поверхности: $\alpha_{\min} = \alpha(P_{\min})$, $\alpha_{\max} = 2\alpha_B = \alpha(P_{\max})$, $\alpha_{\text{inv}} = \alpha(P=0)$

ленные спектрополяриметрические измерения лунных деталей. По этим данным им были вычислены усредненные значения степени максимальной поляризации P_{\max} (рис. 2) (т. е. поляризации при фазовом угле, равном удвоенному значению угла Брюстера) для отдельных типов образований лунной поверхности.

По этому параметру поляризации Кварцхелия сгруппировал лунные участки следующим образом: лунные моря и заливы обнаруживают степень максимальной поляризации от 10 до 16 %, для большинства кратеров на морской поверхности она находится в пределах 8—12 %, для кратеров с центральными горками — 6—8 %, для лучевых кратеров — 4—6 %. Его специальные исследования позволили обнаружить, что самая низкая поляризация имеет место для кратера Прокл (3.6 % при угле фазы около 100°), а самая высокая (18 %) — внутри разрушенного кольца в Океане бурь между кратерами Флемстид Д и Флемстид К.

Лунную поверхность в течение 29 безоблачных ночей можно наблюдать из Земли фактически во всем возможном диапазоне фазовых углов. Этот факт позволяет исследовать ее различные оптические характеристики, хотя и для очень крупномасштабных деталей. Благодаря работам Кварцхелия, Дольфюса и Бовела [3], а также наблюдениям сотрудников Астрономического института Харьковского национального университета им. Каразина фазовая зависимость положительной поляризации (и в особенности в максимуме положительной поляризации P_{\max}) в зависимости от альбедо в видимом диапазоне спектра изучена довольно хорошо. Но распределение значения фазового угла, при котором наблюдается максимальное значение поляризации P_{\max} по лунному диску (и тем более для деталей меньше нескольких десятков километров) и его корреляции с другими оптическими параметрами — фактически не исследованы. Можно назвать практически только одну такую работу [4],

касающуюся изучения данного вопроса в двух широкополосных фильтрах (λ 461 и 669 нм) видимого диапазона.

Базируясь на наборе поляриметрических наблюдений лунной поверхности, для восточного полушария Луны были построены карты максимума линейной положительной поляризации P_{\max} от ее фазового угла α_{\max} . Минимальный размер исследуемых деталей на поверхности Луны превышал 8 км. Оказалось, что распределение P_{\max} для морей имеет больший разброс, а диапазон изменения $P_{\max} = 4.0 \dots 21.0 \%$ для $\lambda = 461$ нм и $3.0 \dots 15.0 \%$ для $\lambda = 669$ нм. Значения фазовых углов с максимальным значением поляризации для синего фильтра находятся в пределах $94.0^\circ \dots 106.0^\circ$, а для красного — $90.0^\circ \dots 105.0^\circ$. Диаграмма корреляции α_{\max} — альбедо (рис. 3) показывает практически линейную зависимость между параметрами: коэффициент корреляции равен -0.905 для $\lambda = 461$ нм и -0.911 для $\lambda = 669$ нм, т. е. наблюдается существенная линейная антокорреляция.

Корреляционная диаграмма $\alpha_{\max} — P_{\max}$ харьковских наблюдений (рис. 4), в отличие от наблюдений Кварцхелия [1] и более ранних наблюдательных данных [3], показывает существенно нелинейную зависимость.

С целью интерпретации наблюдательных данных проводились также исследования многочисленных земных образцов. Результаты этих исследований показали, что лунные детали сильно различаются

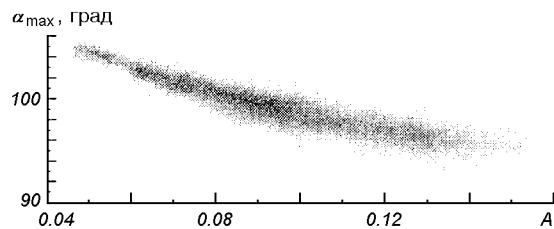


Рис. 3. Диаграмма корреляции α_{\max} — альбедо [4]

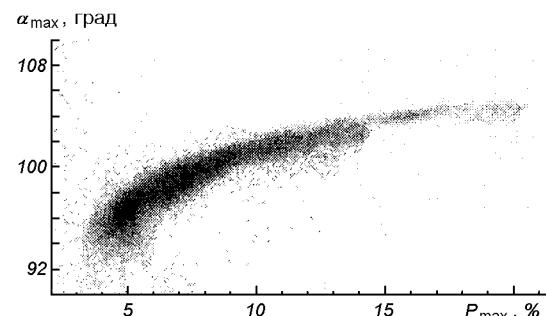


Рис. 4. Корреляционная диаграмма $\alpha_{\max} — P_{\max}$ [4]

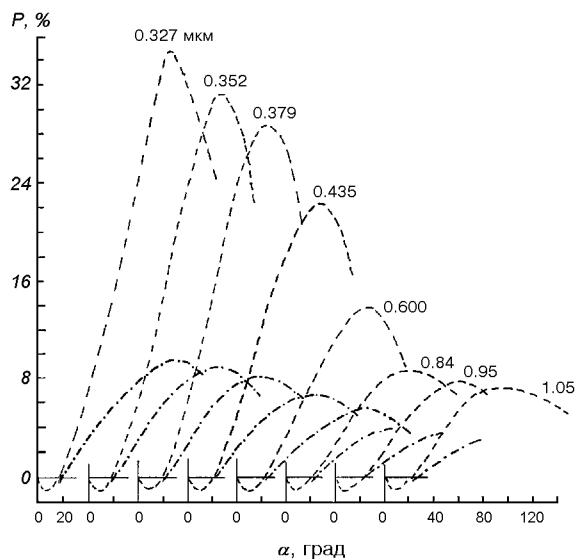


Рис. 5. Спектральные фазовые кривые поляризации деталей в океане Процелларум (пунктир) и в районе Шиллера (штрих-пунктир) [2]

значением максимума степени поляризации P_{\max} . С уменьшением длины волны в спектральном интервале $\lambda = 0.3 \dots 1.1$ мкм степень поляризации увеличивается (см. рис. 7 работы [2]). Именно параметры вектора Стокса Q и U определяют степень и положение плоскости линейной поляризации и являются функциями угла фазы. Значения этих параметров также зависят от величины показателя преломления $m(\lambda)$ и структуры поверхности. Еще в начале XX в. Умов экспериментально обнаружил, что более светлые детали имеют меньшую поляризацию, и объяснил это деполяризующим влиянием многократно рассеянного света.

Особенно следует отметить, что многие детали, степень поляризации которых в длинноволновой области спектра практически одинакова, в УФ-лучах очень сильно различаются своими поляризующими свойствами.

Как отчетливо видно на рис. 5, кроме более чем четырехкратного роста значения степени поляризации при переходе от красных лучей к УФ-участку спектра, фазовая кривая в ультрафиолетовых лучах позволяет намного более точно и определенно говорить о величине фазового угла, при котором наблюдается максимальное значение степени поляризации. И если в синих лучах ($\lambda = 435$ нм) α_{\max} определяется с точностью до $4 \dots 6^\circ$, то уже при $\lambda = 327$ нм погрешность не превышает $1 \dots 2^\circ$. Даже простая линейная интерполяция позволяет нам утверждать, что при поляриметрическом исследовании лунной поверхности в УФ-диапазоне в

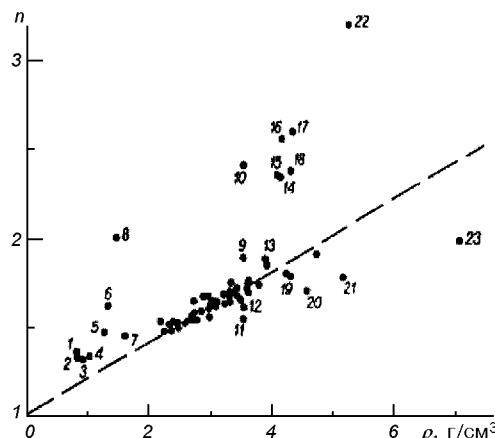


Рис. 6. Соотношение между коэффициентом преломления n и плотностью ρ жидких и твердых веществ. 1 — лед, 2 — ацетон, 3 — алкоголь, 4 — вода, 5 — глицерин, 6 — бисульфидный углерод, 7 — четыреххlorистый углерод, 8 — сера, 9 — титанит, 10 — алмаз, 11 — хризалит, 12 — топаз, 13 — сидерит, 14 — «wurtzite», 15 — сфалерит, 16 — брукит, 17 — рутил, 18 — гоетит, 19 — «хенотім», 20 — барит, 21 — «monazite», 22 — «hematite», 23 — касситерит

$\lambda \approx 240 \dots 260$ нм с борта орбитальной станции Луны позволит определять значение фазового угла α_{\max} для участков поверхности размерами в сотни, а то и десятки метров с точностью лучше 1° . УФ-участок спектра намного более предпочтительный при дистанционных орбитальных изучениях минеральных шероховатых поверхностей безатмосферных космических тел еще и по той причине, что диффузно отраженное в этом диапазоне спектра излучение почти полностью формируется при однократном отражении от подстилающей поверхности. Знание таких оптических параметров поверхности Луны, как α_{\max} и P_{\max} , с указанными выше точностями позволит определить показатели преломления минеральных частиц на ее поверхности.

Выводы. Таким образом, коэффициенты преломления прозрачных и полупрозрачных материалов, которые довольно однозначно указывают на их химический состав, могут быть измерены с высокой точностью при дистанционных спектрополяриметрических измерениях в ультрафиолетовом участке спектра. В дополнение к этому для повышения надежности получаемых данных можно также использовать приведенную на рис. 6 зависимость между коэффициентом преломления m и плотностью ρ различных веществ.

Как видно, для подавляющего большинства веществ эти параметры подчинены выражению $n = 1 + 0.2\rho$, что показано пунктиром на рис. 6.

Тщательный анализ приведенных наблюдательных данных и результаты их интерпретации позволяют сделать вывод о том, что имеющаяся на сегодня инструментальная база и наш опыт в изготовлении спектрополяриметрической аппаратуры может быть успешно использован при подготовке и осуществлении научной программы космического эксперимента «Лунный орбитальный модуль».

Представленная работа выполняется при частичной финансовой поддержке Национального космического агентства Украины (контракт «АСТРО») и Научно-технологического центра в Украине (грант NN43).

1. Кварцхелия О. И. Зависимость степени поляризации отраженного Луной света от угла фазы // Сообщения АН ГРЗССР.—1983.—112, № 2.—С. 293—296.
2. Мороженко А. В. О минералогическом картировании лунной поверхности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1983.—1.—С. 86—92.
3. Dollfus A., Bowell E. Polarimetric properties of the lunar surface and its interpretation. Part 1. Observations // Physique du système solaire. — Medon, Observatoire de Paris, 1969.—64 p.
4. Korokhin V. V., Velikodsky Yu. I. Parameters of the maximum positive polarisation of the Moon // 35th Lunar and Planetary Sci. Conf., March 15–19, 2004, League City, Texas. — League City, 2004.—Abstract n. 1306 (2P.)
5. Peterson C. A., Hawke B. R., Lucey P. G., et al. The Distribution of Anorthosite on the Lunar Farside // Workshop on New Views of the Moon 2: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, 1999.—P. 46.
6. Pieters C. M. Mineralogy of the Moon: How did we start? What

did we find? Where are we going? // American Geophysical Union, Fall Meeting 2002. — 2002.—Abstract #P51C-03.

7. Pinori S., Bellucci G. Regional Dark Mantle Deposits on the Moon: Rima Bode and Sinus Aestuum Analysis // Workshop on New Views of the Moon 2: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, 1999.—P. 49.
8. Sasaki S., Iijima Y., Tanaka K., et al. Scientific Research in the Lunar Orbiting Mission // IAF abstracts. 34th COSPAR Scientific Assembly, The Second World Space Congress, held 10–19 Oct., 2002 in Houston, TX, USA. — 2002.—P. Q-4-3-04.

MAPPING OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MOON'S SUPERFICIAL LAYER AND ULTRA-VIOLET POLARIMETRY FROM A LUNAR ORBITAL STATION

A. P. Vid'machenko, A. V. Morozhenko

Ground and space researches of the Moon allowed one to carry out large-scale mapping of its superficial layer. Morphological details of the Moon have various spectral reflective properties. Their characteristic features are decrease of its reflectivity from visual spectral region to ultra-violet one and absorption bands in near infra-red spectral region. This points to mineralogy of the Moon's surface. Morphological features with different optical and physical properties have different polarization. In the long-wave spectral region, the degree of polarization is practically identical for many details on the Moon's surface, but its values differ strongly in ultra-violet region. The phase curve in ultra-violet region allows one to determine the value of phase angle α_{\max} at which the maximal value of degree of polarization P_{\max} takes place, with error less than 1° . These optical parameters of the Moon's surface enable us to determine refraction indexes of its mineral particles, i. e., to make mapping of the Moon's minerals.

УДК 523.4

© С. П. Неводовський, А. П. Відьмаченко,
О. В. Мороженко, П. В. Неводовський, І. І. Синявський

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

УКРАЇНСЬКИЙ МОЛОДІЖНИЙ СУПУТНИК: ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОЗОЛЬНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ ЗЕМЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ УФ-ПОЛЯРИМЕТРА

Розглядаються механізми змін концентрації стратосферного озону у верхніх шарах земної атмосфери (вище 30 км). Пропонується проект бортового УФ-поляриметра на довжину хвилі $\lambda \approx 250$ нм для українського молодіжного супутника. Реалізація поданого проекту дозволить отримати спостережні дані, аналіз яких дасть змогу з високою достовірністю визначити значення комплексного показника заломлення, а також розмір частинок, горизонтальну структуру аерозольного шару і дослідити її зміну в часі.

ВСТУП

Останні десятиріччя минулого століття для землян позначились такими катастрофічними явищами, як появаю озонових дірок в атмосфері. Була висунута

гіпотеза, що основним чинником цього явища є фреони. Тому Міжнародні угоди (Женевська конвенція про глобальний перенос забруднювальних домішок та відповідний Протокол до неї про обмеження викидів оксидів азоту, Віденська конвенція

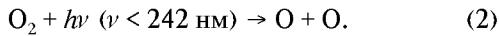
про захист озонового шару, Монреальський протокол про обмеження та заборону виробництва озононебезпечних хлорфторуглеводнів) було спрямовано на боротьбу з фреонами як головними руйнувачами озоносфери. Однак в кінці 1990-х років було висунуто гіпотезу, згідно з якої зменшення концентрації стратосферного озону сприяє збільшенню аерозольного забруднення у верхніх шарах земної атмосфери (вище 30 км).

Нагадаємо, що основним механізмом утворення озону є реакція потрійних зіткнень атомарного та молекулярного кисню



де M — довільна третя молекула, яка стабілізує проміжні продукти реакції та збалансовує кінетичну енергію та енергію імпульсу.

Основним джерелом атомарного кисню є дисоціація молекули кисню в ході реакції фотодисоціації



Така реакція починається у випадку, коли енергія фотона досягне деякого порогового значення $h\nu_0$. Для молекули кисню на довжині хвиль $\lambda < 242 \text{ нм}$ ця енергія дорівнює 5.117 еВ. Крім того, відзначимо, що дисоціація може проходити в процесі реакцій двокомпонентних та трикомпонентних зіткнень молекул:



де A , B , M — молекули реакцій зіткнень, C — молекула, утворена в процесі реакцій зіткнень.

Реакція (2) означає, що в залежності від енергії поглинутого фотона, молекула A або переходить у збуджений стан A^* , який може бути обертовим, коливальним чи електронним, або буде відповідати умовам, при яких відбуваються процеси дисоціації чи іонізації молекули. Швидкість утворення збуджених молекул визначається рівнянням

$$\frac{d[\text{A}^*]}{dt} = [\text{A}] \int_{\nu_0}^{\infty} I_{\nu} \exp \left[-\left(\tau_0^g(\nu) + \tau_0^a(\nu) \right) \right] \alpha_{\nu} d\nu \equiv [\text{A}] J$$

де $[\text{A}^*]$ та $[\text{A}]$ — об'ємні концентрації збуджених та незбуджених молекул відповідно, I_{ν} — інтенсивність сонячного випромінювання на верхній межі атмосфери, ν_0 — частота, яка відповідає пороговій енергії фотона, при якій починається реакція фотодисоціації, $\tau_0^g(\nu) = \tau_p^g(\nu) + \tau_n^g(\nu)$ та $\tau_0^a(\nu) = \tau_p^a(\nu) + \tau_n^a(\nu)$ — оптичні товщини газової та аерозольної складових атмосфери, а індекси « p » та « n » означають розсіювальні та поглинальні складові оптичної

товщини, α_{ν} — монохроматичний коефіцієнт поглинання газу, J — коефіцієнт швидкості фотодисоціації, μ — синус висоти Сонця над горизонтом. Наскільки нам відомо, до цього часу у відповідних розрахунках враховувалась лише газова складова атмосфери, тобто вважалось, що $\tau_0^a(\nu) = 0$.

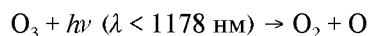
Швидкість двокомпонентних (3) та трикомпонентних (4) реакцій визначається як

$$\frac{d[\text{C}]}{dt} = [\text{A}] [\text{B}] k_{AB},$$

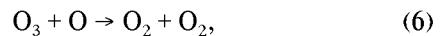
$$\frac{d[\text{C}]}{dt} = [\text{A}] [\text{B}] [\text{M}] k_{ABM},$$

де k_{AB} і k_{ABM} — відповідні коефіцієнти.

Що стосується знищенню молекул озону, то тут також основними є реакції фотодисоціації



$h\nu_0 = 1.052 \text{ еВ}$) та зіткнення молекули озону з атомом кисню



Протягом деякого часу між озоном та молекулярним киснем встановлюється рівновага, яка визначається відношеннями

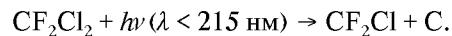
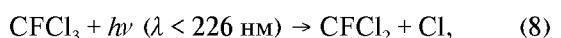
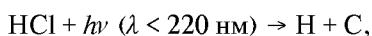
$$\frac{[\text{O}_3]}{[\text{O}_2]} \approx \left(\frac{k_{12} J_2 [\text{M}]}{k_{13} J_3} \right)^{1/2} \quad (7)$$

вдень, та

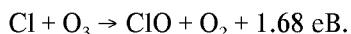
$$\frac{[\text{O}_3]}{[\text{O}_2]} \rightarrow \frac{k_{12} [\text{M}]}{k_{13}}$$

вночі. Тут J_2 , J_3 — коефіцієнти швидкості фотодисоціації атомів кисню та озону, а k_{12} та k_{13} — коефіцієнти швидкостей реакцій дисоціації в процесі подвійного зіткнення молекул кисню та озону відповідно.

Крім цих основних реакцій, у фотохімії озону відповідну роль відіграють й інші газові складові, але оскільки їхня роль значно менша, увагу на них акцентувати не будемо. Виняток зробимо лише для фреонів, які тривалий час вважались основними знищувачами озону. Фреони безпосередньо з озоном не взаємодіють. Але атом хлору, який є основою цих сполук, у процесі реакції фотодисоціації відривається від молекули фреону. Такими основними реакціями є



Звільнений атом хлору взаємодіє з озоном:



Оскільки для відриву атомів фтору від молекул фреону необхідна значно більша енергія фотонів, то імовірність цього процесу можна важати дуже малою, а тому відповідні реакції не приводимо.

Очевидно, що значення коефіцієнтів диссоціації J для реакцій (8) будуть значно менші, ніж для молекул кисню — реакція (2), а тому, з огляду на значно менші концентрації фреонів, навряд чи кількість вивільнених атомів хлору змогли суттєво вплинути на стан озоносфери.

Як було сказано вище, далеко не всі фахівці поділяли «фреонну гіпотезу», а тому розробляли альтернативні ідеї. Одна з них пов'язана зі зміною сонячної сталої, яка в ультрафіолетових променях ($\lambda < 300$ нм) може сягати 30 %. В роботі [4] було показано, що такі зміни обумовлюють варіації об'ємної концентрації стратосферного озону у межах 3 %, що значно менше, ніж дані спостережень. Крім того, такі зміни мусять корелювати з 11-річним циклом сонячної активності і не залежати від висоти Сонця над горизонтом, що випливає з (5), а тому одночасно спостерігались на всій земній кулі.

В кінці 1990-х років було висунуто гіпотезу, згідно з якою зменшення концентрації стратосферного озону сприяє збільшення аерозольного забруднення у верхніх шарах земної атмосфери (вище 30 км). В цій моделі, згідно з виразом (5), на зміну $\tau_0^a(v)$ найперше відреагують приполярні райони. Крім того, оскільки аерозольний шар може бути не суцільним, а складатись із локальних утворень, то зменшення концентрації озону також може бути обмежене локальними районами, тобто з'являться окремі озонові дірки. Стержневим цієї гіпотези є загальновідомий факт про зміну оптичної товщини з довжиною хвилі, яка в першому наближенні описується виразом λ^{-n} . Нагадаємо, що для газової складової $n = 4$, для розсіюваної аерозольної складової $n < 4$ (дрібні частинки) і $n = 0$ (великі частинки), а в деяких випадках і $n < 0$. Для поглинаного аерозолю, особливо коли уявна частина показника заломлення збільшується зі зменшенням довжини хвилі, значення цього параметра може бути більше за 4. Очевидно, що у випадку дрібного аерозолю зміна $\tau_0^a(v)$ сильніше проявиться на зміні коефіцієнта J для тих газів, для яких реакція фотодисоціації відбувається при взаємодії з більш високочастотними фотонами. Хоча збільшення оптичної товщини зумовить зменшення коефіцієнта J для всіх газів, але, як видно з виразів (2) і (6), для молекули кисню воно буде відчут-

нішим, ніж для озону. Через це зменшення продуктивності утворення атомів кисню (а значить і молекул озону) буде більшим, ніж уповільнення продуктивності реакції фотодисоціації молекул озону. Це означає, що в цій моделі спостережне зменшення концентрації стратосферного озону зумовлено не пришвидшенням процесу руйнації молекул озону, а зменшенням швидкості його утворення. До речі, рівновага озон — кисень (7) наступить при менших концентраціях озону. Відповідне моделювання [2] показало, що на згаданих висотах зменшенню концентрації озону на 10 % відповідає поява аерозольного шару з оптичною товщиною (на довжині хвилі 1 мкм) приблизно 0.002 для частинок з середньогеометричним радіусом 0.05 мкм, чи 0.02 для частинок 0.10 мкм. Відзначимо, що тут розглядався нормальнологарифмічний закон розподілу частинок за розмірами (з дисперсією розмірів 0.1), а частинки вважалися повністю розсіюючими.

Важливо відзначити, що збільшення аерозольного забруднення верхніх шарів атмосфери ще більше зменшує руйнівну силу (відносно озону) хлорфторуглеводнів. Це зумовлено тим, що основні реакції зі створенням в атмосфері атомарного хлору відбуваються при взаємодії з фотонами $\lambda < 226$ нм, тобто швидкості цих реакцій зменшаться більше, ніж для молекулярного кисню.

Джерелами стратосферного аерозолю можуть бути: мікрометеорити, уламки оболонок штучних супутників Землі, винесені конвективними атмосферними потоками продукти згоряння (заводські труби, пожежі, вулкани), конденсація різних газів та інше. Про потужність стратосферного аерозолю можна судити з рис. 1, побудованого за даними ШСЗ «Німбус-7» [5]. На ньому два піки зумовлені виверженнями вулканів Ель Чічон (1982 р.) і Маунт Хадсон та Пінатабо (1991 р.). До речі, дрібні частинки (з радіусами менше 0.1 мкм) можуть роками знаходитись на цих висотах.

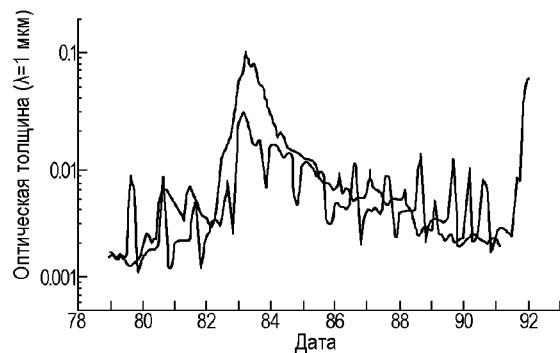


Рис. 1. Зміна в часі оптичної товщини аерозольного шару над Антарктидою на довжині хвилі 1 мкм

Для коректного моделювання процесу зміни концентрації стратосферного озону в рамках цього механізму і прогнозування появи цього ефекту над різними регіонами земного шару необхідно отримати дані про фізичні характеристики аерозольних частинок (величини комплексного показника заломлення, параметри функції розподілу частинок за розмірами, потужність (оптичну товщину) аерозольної складової атмосфери на висотах більше 30 км), а також структуру аерозольної складової в горизонтальній площині.

На жаль, інформація з цього питання досить обмежена і отримана методом спектрофотометрії близьку Сонця при його затемненню земною атмосferою. В той же час досвід досліджень аерозольно-газових шарів атмосфер планет Сонячної системи переконливо свідчить, що серед дистанційних методів досліджень з цього напрямку найефективнішим є поляриметричний [1]. Оскільки нас цікавить аерозоль на висотах більше ніж 30 км, то відповідні поляризаційні вимірювання потрібно вести на довжинах хвиль $\lambda < 300$ нм, де наявність потужного озонового поглинання повністю відсікає внесок тропосферного аерозолю. Наскільки нам відомо, поки що не реалізовано жодного проекту з дослідження поляризаційних властивостей відбитого Землею сонячного випромінювання у цій ділянці спектру з борту ШСЗ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Запропонований проект, який передбачає виготовлення бортового УФ-поляриметра (БУФП), ліквідує цю прогалину і дозволить не лише визначити характеристики і структуру стратосферного аерозолю, але й промоделювати стан озонасфери над різними регіонами земної кулі.

Ідея експерименту полягає в тому, що за допомогою УФ-поляриметра, встановленого на борту мікросупутника, систематично в кожий з його обертів навколо Землі проводити вимірювання відносної інтенсивності, ступеня поляризації і положення площини поляризації дифузно відбитого земною атмосферою сонячного випромінювання. Завдяки тому, що озоновий шар практично повністю поглинає сонячне випромінювання на $\lambda < 300$ нм, є можливість отримати інформацію про фізичні властивості атмосфери для висот більш ніж 30 км. Частка ультрафіолетового випромінювання, яка попадає в об'єктив бортового УФ-поляриметра, оптична вісь якого нахиlena до надиру під кутом α , і є об'єктом дослідження (рис. 2). Поляриметричні дані, отримані протягом багатьох обертів мікро-

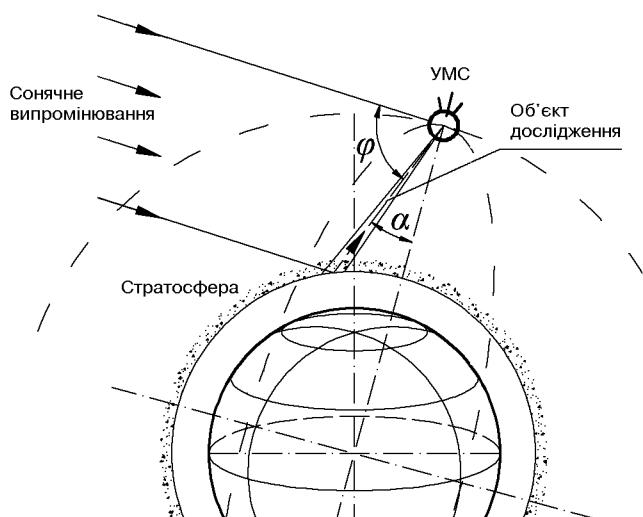


Рис. 2. Модель дослідження поляризації стратосферного аерозолю з борту УМС

супутника, дозволять побудувати їхню залежність від фазового кута φ для різних ділянок Земної кулі.

Аналіз цих даних дозволить з високою достовірністю визначити значення дійсної і уявної частини показника заломлення, а також розміру частинок, горизонтальну структуру аерозольного шару і дослідити імовірну її зміну в часі. Наявність цієї інформації дозволить провести точне моделювання процесів фотодисоціації молекул різних газів, в першу чергу молекул кисню і озону з урахуванням ослаблення інтенсивності випромінювання Сонця не лише газовою, але й аерозольною складовою верхніх шарів земної атмосфери. Все це дає можливість промоделювати швидкості утворення і руйнації молекули озону над різними ділянками земної кулі. В свою чергу, це дозволить однозначніше визначити механізм появи озонових дір, а значить й розробляти й приймати на Міжнародному рівні більш обґрутовані заходи, що до запобігання цього катастрофічного явища.

Структурна схема експерименту зображена на рис. 3.

I. Об'єктом дослідження (ОД) є середовище в об'ємі, який утворюється при перетині умовного конуса огляду (зору) БУФП шаром стратосферного аерозолю.

II. Оптична система збору та формування потоку випромінювання (СЗФВ), яка збирає необхідну кількість випромінювання і створює плоскопаралельний пучок світла на розраховану потужність.

III. До складу оптико-механічного блоку (ОМБ) входять:

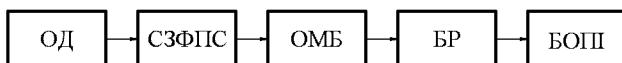


Рис. 3. Структурна схема побудови експерименту

- діафрагма, яка обмежує розміри пучка випромінювання;
- поляроїдний модулятор, який перетворює поляризаційні параметри Стокса в інтенсивність світлового потоку;
- блок світлофільтрів дозволяє зробити селекцію випромінювання по довжині хвилі;
- блок формування зображення на приймач випромінювання;
- блок тестування потоку світла;
- блоки контролю температури.

IV. Блоки реєстрації корисного сигналу (БР):

- блок фотоелектронного приймача;
- підсилювач корисного сигналу;
- система дискримінації вихідних імпульсів;
- блок живлення, куди входить блок високої напруги.

V. Блок формування, обробки та передавання інформації (БОПП), який забезпечує управління роботою БУФП, формування, зберігання і передачу отриманої інформації на Землю.

Таке спрощення та мініатюризація базується на тому, що пристрій планується встановити на борт Українського молодіжного супутника (УМС), корисні габарити та потужність якого дуже обмежені.

ПРИНЦІПОВА СХЕМА ПОБУДОВИ ПРИЛАДУ

Нами було прораховано і розглянуто кілька методик визначення поляризації, і до кожної з них пророблялися різні варіанти функціональних та оптических схем бортового ультрафіолетового поляриметра (БУФП). Найпридатнішою для БУФП на УМС є схема із статичним способом вимірювання поляризації (рис. 4).

Взагалі поляризаційний метод базується на перетворенні поляризаційних компонент світлового потоку в його інтенсивність. Такі перетворення можна проводити статичним і модуляційним способами. Поляризаційний статичний спосіб базується на одночасному вимірюванні інтенсивності випромінювання від двох розділених компонентів з перпендикулярною поляризацією, і накладає жорсткі вимоги до ідентичності обох каналів реєстрації світла, а також вимагає, щоб площа поляризації поляризаційного модулятора була зорієнтована паралельно до площини розсіяння. В даному випадку модулятор складається з поляризаційної призми, яка розділяє досліджуваний пучок світла відносно площини поляризації на звичайний та незвичайний. Далі світловий потік кожного каналу попадає на ФЕП, де він перетворюється на електричний сигнал за класичною схемою [3]. Далі сигнал походить на блок формування обробки і передачі інформації (БП), звідки інформація попадає на Землю.

Такий варіант побудови схеми БУФП на УМС (враховуючи енергетичні, вагові, габаритні вимоги до УМС) є найбільш придатним.

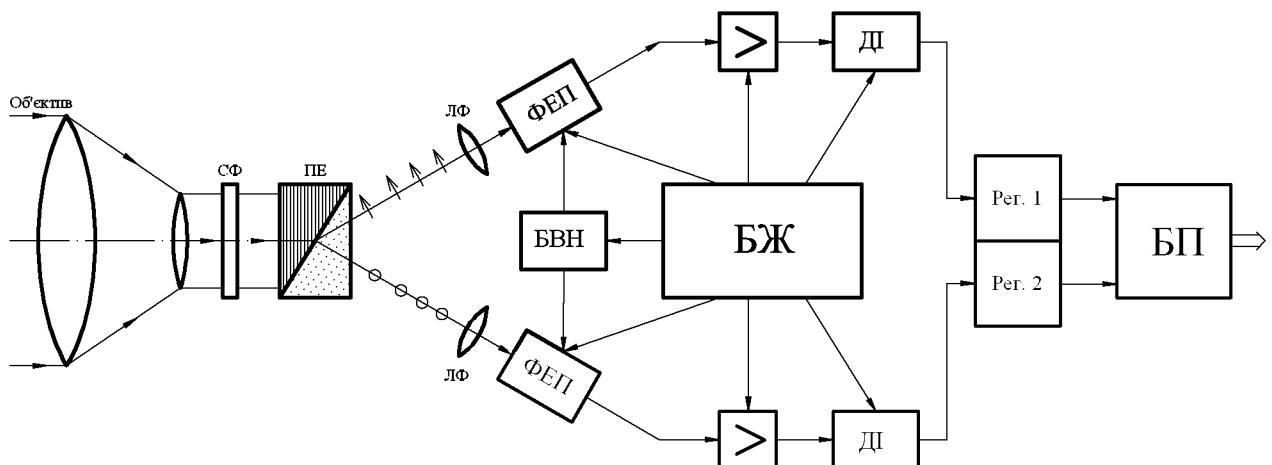


Рис. 4. Принципова схема побудови БУФП. СФ — світловий фільтр, ПЕ — поляризаційний елемент, ЛФ — лінза Фабрі, ФЕП — фотоелектронний помножувач, ДІ — дискримінатор імпульсів, БВН — блок високої напруги, БЖ — блок живлення, Рег. 1. Рег. 2. — регістри, БП — блок формування обробки і передачі інформації

Інший можливий варіант — використання трьох поляризаторів (наприклад, призм Глана), які нерухомо розміщені так, що їхні площини поляризації зміщені на кути 60° і 120° . Хоча в цьому випадку ускладнюється вирішення проблеми метрології, але знімається вимога до строгої прив'язки площини поляризації до площини розсіяння.

ВИСНОВКИ

Реалізація проекту дає можливість визначити значення дійсної частини показника заломлення і розмірів стратосферного аерозолю, його оптичну товщину, а також дослідити горизонтальну структуру аерозольного шару і його зміни в часі. Це дасть можливість провести точне моделювання процесів фотодисоціації молекул різних газів, у першу чергу і озону, із врахуванням ослаблення випромінювання верхніми шарами земної атмосфери, а значить і промоделювати швидкості утворення і руйнування молекули озона над різними ділянками земної кулі. В свою чергу, це дозволить точніше визначити механізм появи озонових дір, а отже, розробляти і приймати на міжнародному рівні обґрунтовані заходи щодо запобігання цьому катастрофічному явищу.

1. Мороженко О. В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — К.: Наук. думка, 2004.—647 с.
2. Мороженко О. В., Шаврина А. В., Велесь О. А. Роль стратосферного аерозолю у формуванні озонового шару // Кінематика и фізика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 364—368.
3. Неводовський П. В., Видъмаченко А. П. Оптимизация параметров фотоумножителей класса «Квантакон» // Тез. докл. 13-й Всерос. научно-техн. конф. «Обеспечение единства измерений в фотометрии и радиометрии оптического излучения». — М., 2001.—С. 17.
4. Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер. — М.: Мир, 1981.—352 с.
5. Hansen J. Climate Forcing and Feedbacks // Long-term monitoring of global climate Forcing and feedbacks. — New York, NASA Conf. publ.—1993.—3234.—Р. 6—12.

THE UKRAINIAN YOUTH SATELLITE: INVESTIGATION OF THE EARTH'S AEROSOL STRATUM WITH THE USE OF UV-POLARIMETER

Ye. P. Nevodovskyi, A. P. Vid'machenko, O. V. Morozhenko, P. V. Nevodovskyi, I. I. Syniavskyi

We consider some reasons for changes in concentration of stratospheric ozone in upper stratum of the Earth's atmosphere (for heights more than 30 km). The Project of board UV-polarimeter for a wavelength of 250 nm for the Ukrainian Youth Satellite is proposed. Realization of the Project will give the possibility to derive with assurance the real and imaginary parts of the refractive index, sizes of small particles, horizontal structure of the aerosol stratum and to investigate its changes with time.

УДК 520.36

© Ю. С. Иванов, И. И. Синявский, М. Г. Сосонкин

Головна астрономічна обсерваторія НАН Україна, Київ

БОРТОВОЙ УФ-СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР

Розглядається методика побудови спектрополяриметра підвищеної ефективності. Показано, що обмежена кількість елементів може виконувати функції оптичного редуктора, диспергуючого блоку і коректора аберрацій. Такий підхід особливо вигідний в УФ-діапазоні, де велика кількість елементів традиційних спектрополяриметрів приводять до великих втрат. Пропонується система рознесених диспергуючих призм, що забезпечує вирівнювання дисперсії і додатково підвищує ефективність приладу в короткохвильовій ділянці спектру.

ВВЕДЕНИЕ

Поляриметрические измерения вызывают растущий интерес астрофизиков, так как дают возможность определять: спектральные значения комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, распределение их по размерам, относительное содержание аэрозоля. Они позволяют изучать изменения оптических и тепловых свойств планетных

32

атмосфер с солнечной активностью. Зачастую такую информацию невозможно получить другим способом.

Весьма перспективными являются исследования поляризации в УФ-области спектра, но этот диапазон недоступен с поверхности Земли и требует специальных приборов для измерений с борта искусственных спутников и космических станций.

К сожалению, за последние 20—30 лет во всем

мире было произведено не более десяти таких экспериментов, к тому же с несовершенными спектрополяриметрами. Эти измерения проводились либо поляриметрами с фильтрами, либо приборами на базе щелевых спектрометров.

В рамках космического эксперимента «Планетный мониторинг» в Главной астрономической обсерватории НАН Украины совместно с Институтом космических исследований РАН разрабатывается спектрополяриметр для мониторинга планетных атмосфер. Прибор предназначается для оснащения телескопа Т-40, устанавливаемого на борту Международной космической станции. Для построения прибора наивысшей эффективности синтез оптической схемы производился по результатам анализа поляриметра как канала передачи информации [5].

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА

При разработке прибора учитывались следующие требования:

- спектральный диапазон $\lambda\lambda = 0.23...0.4$ мкм;
- динамический диапазон 10^4 ;
- спектральное разрешение 20–30 элементов на спектр;
- пространственное разрешение 1–2";
- поляризационная эффективность — не хуже 0.8 от теоретической.

Наиболее удобным и универсальным способом анализа поляризации излучения является преобразование ее вращающейся фазовой пластинкой в интенсивности лучей с ортогональной поляризацией. Классический спектрополяриметр включает в себя следующие элементы: вращающуюся фазовую пластинку, коллиматор, сепаратор по поляризации, диспергирующий узел, камеру. Большие потери света на многочисленных поверхностях в спектрополяриметрах снижают эффективность таких приборов при изучении слабых объектов.

Для спектрального разложения излучения в спектрополяриметрах используются дифракционные решетки или призмы [2]. Использование дифракционных решеток ведет к наложению спектров различных порядков, невысокой энергетической эффективности и ограничению спектрального диапазона (не более одной октавы). Следует отметить также, что дифракционные решетки имеют различную и плохо прогнозируемую эффективность в лучах, поляризованных параллельно и перпендикулярно к штрихам.

При использовании спектральных призм оказывается нелинейность дисперсии; растягивание коротковолнового участка спектра приводит к паде-

нию эффективности устройства в этой области. В астрономии, где выигрыш даже в одну звездную величину существенно расширяет круг решаемых задач, такое падение является нежелательным.

В приборах низкого и умеренного разрешения, работающих в поляризованном свете в широком спектральном диапазоне, предпочтительны призмы. В работе [4] были предложены призменные системы с искусственным квазилинейным хроматизмом, приводится также метод расчета таких систем, которые могут состоять из одиночных или склеенных в моноблок призм из специально подобранных оптических материалов. По методике, предложенной в [2], были проанализированы возможные варианты сочетаний оптических материалов, прозрачных в ультрафиолете. В таблице представлены различные пары сред для призм с выровненной дисперсией. Наиболее перспективны пары LiF-BaF₂, CaF₂-BaF₂; MgF₂-BaF₂. При дальнейших расчетах также следует учитывать перспективность пар по коррекции aberrаций.

Такой подход, в сочетании с деформацией поверхностей призм [1], дает возможность расчета схемы простого и высокоэффективного спектрополяриметра. Следует отметить, однако, что такой способ выравнивания дисперсии требует вычитания дисперсии отдельных компонентов. Поскольку общая дисперсия узла при этом уменьшается, то такой прием пригоден лишь для приборов низкого и среднего спектрального разрешения.

Особенностью разрабатываемого прибора является достижение максимальной эффективности на всех этапах преобразования информации. Для этого, в частности, минимизировано количество элементов и поверхностей. Два элемента оптической системы исполняют функции: а) диспергирующей системы; б) оптического редуктора; в) корректора aberrаций.

Использование фазовых суперахроматических пластинок конструкции В. Кучерова обеспечивает высокую эффективность анализа поляризации (> 0.9) [3], что позволяет измерять круговую и линейную поляризацию в широком спектральном диапазоне.

В качестве сепаратора по поляризации используется пластина Савара. Для минимизации систематических ошибок спектрополяриметра пластина разворачивается на угол 45° относительно главной плоскости оптической системы. Кроме того, она разворачивается на малый угол в меридиональной плоскости для внесения дополнительного хроматизма, увеличивающего дисперсию системы.

Таким образом, схема прибора (рис. 1) состоит всего из четырех элементов: ахроматической фазо-

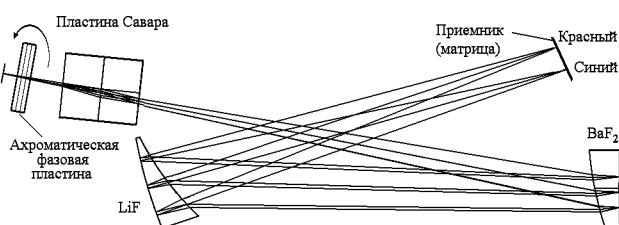


Рис. 1. Оптическая схема спектрополяриметра

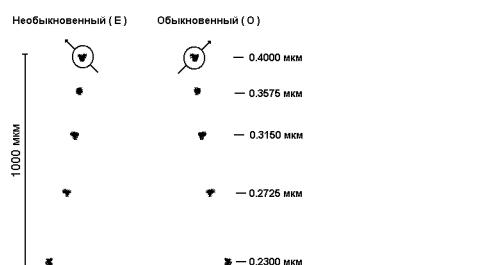


Рис. 2. Расчетная точечная диаграмма в плоскости изображений

Пары оптических сред для выравнивания угловой дисперсии D в диапазоне $\lambda\lambda = 0.23—0.4$ мкм

Кристалл	D, град		
	BaF ₂	F_Silica	Sapphire
LiF	0.0409	0.0213	0.0187
MgF ₂	0.0290	0.0100	0.0073
CaF ₂	0.0365	0.0098	0.0062

вой пластиинки (анализатора), пластины Савара (сепаратора по поляризации) и двух разнесенных деформированных призм.

Описанный подход существенно упрощает оптическую схему, уменьшает ее габариты, а главное – позволяет получить энергетическую эффективность, приближающуюся к теоретически возможной.

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расчеты показывают, что предлагаемая схема обеспечивает высокое качество изображения во всем спектральном диапазоне.

Диаметры пятен соизмеримы с размером пикселя матрицы и составляют около 20 мкм. При размере щели в 50 мкм, устанавливаемой в фокальной плоскости телескопа, разрешение составляет порядка 20-25 элементов на спектр при длине спектра



Вид на плоскость приемника (ПЗС-матрица)

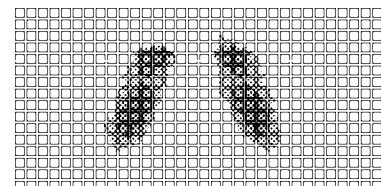


Рис. 3. Формирование спектра в спектрополяриметре

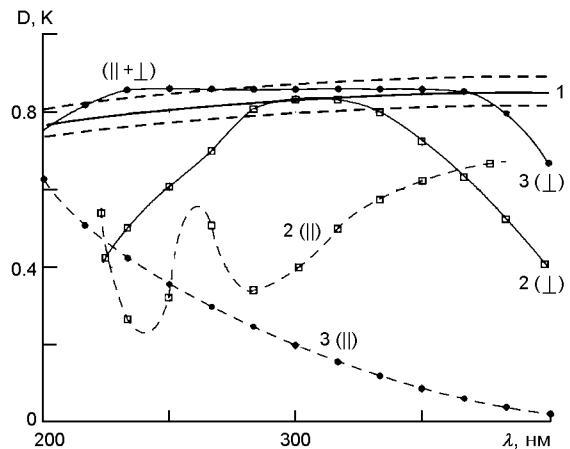


Рис. 4. Энергетическая эффективность различных диспергирующих систем: 1 — приеменная система с линеаризованной дисперсией; 2 — непрофилированная голограммическая решетка; 3 — профилированная голограммическая решетка. А — плоскость поляризации, параллельная плоскости дисперсии, В — плоскость поляризации, перпендикулярная к плоскости дисперсии

немного более 1 мм. На рис. 2 и 3 приведены: расчетная точечная диаграмма и укладка спектра на плоскости приемника.

На рис. 4 показано сравнение энергетической эффективности дифракционных решеток и предложенной диспергирующей системы. Видно, что эффективность предлагаемой системы близка к теоретической. Если же учитывать поглощение излучения в многочисленных оптических элементах, то выигрыш предложенной системы по сравнению с традиционными спектрополяриметрами будет еще больше.

1. Иванов Ю. С., Гершберг Р. Е., Ефимов Ю. С., Шаховской Н. М. Спектрополяриметр низкого разрешения с широкополосной ахроматической пластиинкой и специальной

- призмой Волластона // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 4.—С. 359—376.
2. Іванов Ю. С., Синявський І. І. Спосіб лінеаризації дисперсії призмової системи. // Приладобудування 2004: стан і перспективи: Зб. наук. праць. — Київ: НТУУ «КПІ», ПБФ, 2004.—С. 256.
 3. Кучеров В. А. Ахроматический фазосдвигатель для вакуумного ультрафиолета // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 1.—С. 52—58.
 4. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов: Изд. 2-е, доп. и перераб. — Л.: Машиностроение, 1975.—312 с.
 5. Ivanov Yu. S., Gershberg R. E., Efimov Yu. S., Shakhovskoj N. M. High Efficiency Spectropolarimeter // Proc. SPIE-ESO Symp., Sect. AS06. Munich, March 2000.

**ON-BOARD UV-SPECTROPOLARIMETER
FOR MONITORING OF PLANETARY ATMOSPHERES**

Yu. S. Ivanov, I. I. Sinyavsky, M. G. Sosonkin

A procedure for constructing a spectropolarimeter of heightened efficiency is considered. It is shown that a limited number of elements can perform functions of the optical reduction, dispersing block, and aberrations corrector. This approach should be of particular assistance in the case of the UV spectral region, where numerous surfaces of traditional spectropolarimeters lead to large losses. We offer a system of spaced dispersing prisms providing the equalization of dispersion, which increases further the efficiency of the instrument in the shortwave spectral region.

УДК 629.78.018

© Р. В. Гаврилов, А. М. Кислов,
Ю. А. Меленевский, А. И. Церковный

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

**ИМИТАТОР ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ
ДЛЯ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Розроблено імітатор випромінювання Землі, конструкція якого утворена системою панелей з ліній-чатими ІЧ випромінювачами, що нагріваються електричним струмом. Панелі випромінювачів закріплені на опорно-поворотному пристрій і разом з КА здійснюють програмні повороти відносно потоку випромінювання від імітатора Сонця. Імітатор відтворює на елементах КА сумарну густину поглинутьих потоків власного та відбитого сонячного випромінювання від Землі на заданих витках орбіти. Наведено результати розрахунку проектних параметрів імітатора.

Имитатор излучения Земли разработан для стенда тепловакуумных испытаний космических аппаратов, который создается в ГКБ «Южное». В имитаторе для облучения КА используется управляемый поток ИК-излучения. Имитатор воспроизводит на элементах КА суммарную плотность поглощенных потоков собственного и отраженного солнечного излучения Земли на расчетных витках орбиты. Угловое распределение натурных потоков излучения от Земли, падающих на элементы КА, не воспроизводится.

Имитатор Земли представляет собой систему панелей с дискретными линейчатыми излучателями. Излучатели нагреваются электрическим током до температур, соответствующих требуемым значениям плотностей потоков, поглощаемых элементами КА при движении на витке. Возможность использования нагреваемых линейчатых излучателей для имитации поля собственного излучения Земли рассматривалась в работах [1—4, 8]. Отличительной особенностью разработанного имитатора Земли является то, что панели излучателей закреплены на

опорно-поворотном устройстве в термовакуумной камере и вместе с КА совершают программные повороты относительно потока излучения от имитатора Солнца. При этом в течение цикла программного поворота (испытательный виток) может быть реализована временная зависимость поглощенного потока от Земли, соответствующая заданной ориентации КА на витке. Это позволяет воспроизводить нестационарные тепловые режимы КА при согласованном изменении поглощенных его элементами потоков излучения от имитаторов Земли и Солнца.

В дальнейшем будем рассматривать вариант конструктивной схемы и расчетные параметры имитатора Земли применительно к тепловым испытаниям проектируемого микроспутника. Микроспутник имеет форму параллелепипеда с четырьмя панелями солнечных батарей. Корпус КА, состоящий из плиты установочной, тепловых экранов и основания, имеет размеры $740 \times 740 \times 720$ мм. Панели солнечных батарей (СБ) имеют размер 576×695 мм. Оптические характеристики элементов КА: стенки корпуса — $\varepsilon = 0.9$, $A_s = 0.96$; рабочие стороны

панелей СБ — $\varepsilon = 0.88$, $A_s = 0.88$; нерабочие стороны панелей СБ — $\varepsilon = 0.95$, $A_s = 0.9$.

В орбитальном полете продольная ось КА (установочная плита) направлена в надир. Орбита солнечно-синхронная с наклонением 98.06° и периодом обращения 98 мин. Рассматривается виток, для которого угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце равен $\beta = 22.5^\circ$; Солнце находится вблизи точки весеннего равноденствия. Облученности элементов КА на витке потоками излучения от Земли вычислялись с помощью пакета программ TRASSA [6]. Расчетные значения облученности элементов КА на полувитке и соответствующие плотности q падающих потоков от имитатора Земли на «испытательном» полувитке в опорно-поворотном устройстве (ОПУ) приведены в табл. 1.

Схема расположения панелей излучателей приведена на рис. 1. Панели разделены на три секции, в каждой секции излучатели имеют свою, но одинаковую температуру. Вид микроспутника с панелями излучателей секции 1 и секции 3 приведен на рис. 2 и рис. 3.

Секция 1 облучает установочную плиту КА и частично боковые стенки корпуса. Она состоит из панели 1.1, в которой 16 излучателей-полосок, и четырех боковых панелей-козырьков 1.2, которые имеют по 4 излучателя каждая. Панели 1.2 расположены под углом 60° к плоскости панели 1.1. Панель излучателей 1.1 имеет размеры 780×780 мм, панели 1.2 — 155×780 мм (без учета обрамляющих элементов конструкции); излучатели этой секции имеют размер 5×780 мм. Плоскость излуча-

Таблица 1. Плотности потоков, падающих на тепловые экраны, плиту установочную и нерабочие стороны панелей СБ

Истинная аномалия	Угол поворота КА в ОПУ	q, Вт/м ²		
		Тепловые экраны	Плита установочная	Панели СБ
0...50°	—	55	188	152
50°	125°	55	188	152
60°	115°	55	188	152
70°	105°	55	188	152
80°	95°	57	192	155
90°	85°	67	225	179
100°	75°	85	288	224
110°	65°	104	350	269
120°	55°	121	408	311
130°	45°	136	460	348
140°	35°	149	503	379
150°	25°	159	537	403
160°	15°	166	560	420
170°	5°	169	571	428
175°	0°	170	573	430
180°	-5°	169	571	428

телей панели 1.1 расположена на расстоянии 350 мм от плиты установочной корпуса КА.

Секция 2 облучает боковые стенки корпуса и нерабочие стороны панелей СБ. Секция состоит из четырех панелей по 8 излучателей в каждой. Панели имеют размеры 465×780 мм, излучатели — 5×780 мм. Плоскости излучателей параллельны боковым стенкам корпуса и расположены на расстоянии 330 мм от стенок.

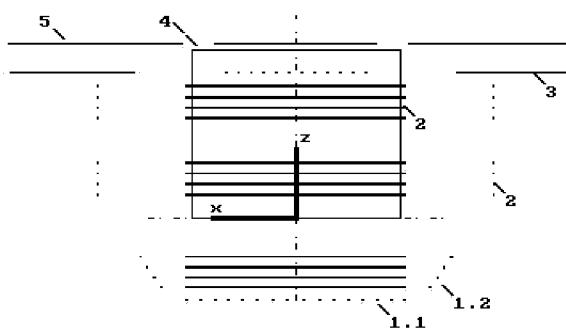


Рис. 1. Схема системы излучателей имитатора Земли: 1.1, 1.2 — панели секции 1, 2, 3 — панели секций 2 и 3, 4 — корпус КА, 5 — панели СБ

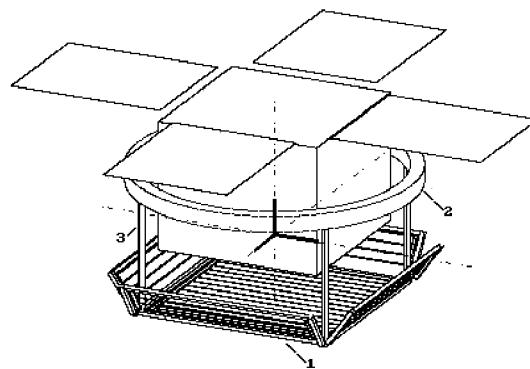


Рис. 2. Микроспутник с панелями излучателей секции 1: 1 — панели секции 1, 2 — силовой пояс, 3 — стойки крепления панелей

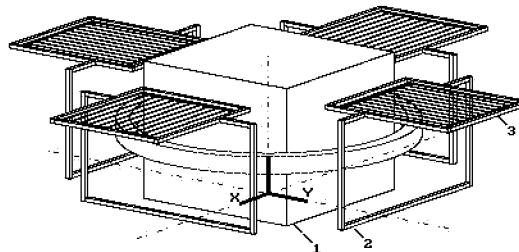


Рис. 3. Микроспутник с панелями излучателей секции 3 (СБ не показаны): 1 — корпус, 2 — рамы панелей секции 2, 3 — панели излучателей секции 3

Секция 3 облучает нерабочие стороны панелей СБ и боковые стенки корпуса КА. Она содержит четыре панели по 12 излучателей. Размеры панели — 500 × 520 мм, излучателей — 5 × 520 мм. Плоскости расположены на расстоянии 120 мм от панелей СБ.

Излучатели выполнены из лент нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0.1 мм. На рабочие стороны лент (обращенные в сторону КА) нанесено покрытие с параметрами $\varepsilon = 0.85$, $A_s = 0.9$. Тыльная сторона лент электрополирована, и при температурах 200—400 °C имеет параметры $\varepsilon = 0.2$, $A_s = 0.5$ [7]. Элементы конструкции, на которых закреплены излучатели и панели, изготовлены из нержавеющей стали. Поверхности элементов, обращенные в сторону КА, электрополированы, и при температурах не выше 300 К имеют параметры $\varepsilon = 0.15$, $A_s = 0.38$ [5]. Внешние поверхности элементов покрыты краской АК-512, для которой $\varepsilon = 0.9$, $A_s = 0.25$.

Решение задачи лучистого теплообмена в системе «имитатор Земли — КА» определяется системой уравнений для плотностей потоков q_i , падающих на установочную плиту ($i = 1$), тепловые экраны ($i = 2$) и нерабочие стороны панелей солнечных батарей ($i = 3$):

$$\begin{aligned} q_1 \varepsilon_1 F_1 &= \Delta F_{s1} \varepsilon^+ \sigma T_{s1}^4 (\varphi_{s,1.1-1}^+ + 4\varphi_{s,1.2-1}^+), \\ q_2 \varepsilon_2 F_2 &= \Delta F_{s1} \varepsilon^+ \sigma T_{s1}^4 \varphi_{s,1.2-2}^+ + \\ &+ \Delta F_{s2} \varepsilon^+ \sigma T_{s2}^4 \varphi_{s2-2}^+ + \Delta F_{s3} \varepsilon^- \sigma T_{s3}^4 \varphi_{s3-2}^-, \\ q_3 \varepsilon_3 F_3 &= \Delta F_{s2} \varepsilon^+ \sigma T_{s2}^4 \varphi_{s2-3}^+ + \\ &+ \Delta F_{s2} \varepsilon^- \sigma T_{s2}^4 \varphi_{s2-3}^- + \Delta F_{s3} \varepsilon^+ \sigma T_{s3}^4 \varphi_{s3-3}^+, \end{aligned} \quad (1)$$

где ε_i , F_i — степень черноты и площадь i -го элемента КА; ΔF_{s1} , ΔF_{s2} , ΔF_{s3} — площади полосок излучателей в секциях 1, 2 и 3; ε^+ , ε^- — степени черноты рабочей и тыльной стороны излучателей; T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} — температура излучателей в секциях 1, 2 и 3; $\varphi_{s,1.1-1}^+$, $\varphi_{s,1.2-1}^+$ — разрешающие угловые коэффициенты (РУК) в поглощенных потоках между рабочими сторонами всех излучателей панели 1.1 и панели 1.2 и установочной плитой; $\varphi_{s,1.2-2}^+$, φ_{s2-2}^+ — РУК между рабочими сторонами всех излучателей панели 1.2 и панели секции 2 и тепловым экраном; φ_{s3-2}^- — РУК между тыльными сторонами излучателей секции 3 и тепловым экраном; φ_{s2-3}^+ , φ_{s2-3}^- — РУК между всеми рабочими и тыльными сторонами излучателей панели секции 2 и нерабочей стороной панели СБ; φ_{s3-3}^+ — РУК

между рабочей стороной всех излучателей панели секции 3 и нерабочей стороной СБ.

Температуры излучателей являются решениями системы уравнений (1) при заданных значениях $q_1(\alpha)$, $q_2(\alpha)$, $q_3(\alpha)$, где α — угол поворота КА в ОПУ. Полученные расчетные значения температуры излучателей в секциях приведены в табл. 2.

Затенение панелями имитатора криоэкранов камеры оценивалось относительным уменьшением РУК излучения между элементами КА и криоэкраном. Коэффициент затенения для i -го элемента КА определяется выражением $\delta_{c,i} = (\varphi_{i-c,o} - \varphi_{i-c,p}) / \varphi_{i-c,o}$; индексы «о» и «р» в разрешающих коэффициентах $\varphi_{i-c,o}$, $\varphi_{i-c,p}$ соответствуют вариантам КА без панелей и с панелями излучателей. Для выбранных элементов КА определялся средний коэффициент затенения криоэкранов $\delta_{c,KA}$. Расчетное значение среднего коэффициента затенения криоэкранов для плиты установочной, тепловых экранов и нерабочих сторон панелей солнечных батарей $\delta_{c,KA} \approx 0.19$. Для всех элементов КА, включая основание корпуса и рабочие стороны панелей СБ, коэффициент $\delta_{c,KA} \approx 0.12$.

Получены оценки коэффициентов затенения панелями имитатора Земли потоков излучения от имитатора Солнца, падающих на элементы КА. Коэффициент затенения для i -го элемента КА определяется как $\delta_{s,i} = (E_{i,o} - E_{i,p}) / E_{i,o}$, где $E_{i,o}$ и $E_{i,p}$ — освещенности i -го элемента для вариантов КА без панелей и с панелями излучателей имитатора Земли. В качестве модели имитатора Солнца рассматривался диск, установленный на фланце вакумной камеры, с равномерной поверхностной плот-

Таблица 2. Температура излучателей в секциях имитатора Земли в зависимости от угла α поворота КА в опорно-поворотном устройстве (v — истинная аномалия)

v	α	t , мин	T_{s1} , К	T_{s2} , К	T_{s3} , К
0...50°	—	—	481.7	446.8	470.5
50°	-125°	0	481.7	446.8	470.5
60°	-115°	2.72	481.7	446.8	470.5
70°	-105°	5.44	481.7	446.8	470.5
80°	-95°	8.16	484.3	451.3	472.6
90°	-85°	10.88	503.8	470.2	489.6
100°	-75°	13.60	535.9	498.9	517.8
110°	-65°	16.32	562.7	525.2	541.7
120°	-55°	19.04	584.7	545.4	561.7
130°	-45°	21.76	602.5	561.6	577.6
140°	-35°	24.48	616.1	574.7	589.9
150°	-25°	27.20	626.3	584.1	599.0
160°	-15°	29.92	632.8	590.5	605.2
170°	-5°	32.64	635.9	593.1	608.0
175°	0°	34.00	636.5	594.1	608.5
180°	5°	35.36	635.9	593.1	608.0

ностью и углом расходности $0 \leq \gamma \leq 4^\circ$ потока излучения. Проведены расчеты локальных значений коэффициента $\delta_{s,i}(\alpha)$ при различных значениях угла поворота α микроспутника в опорно-поворотном устройстве. Среднее значение коэффициента $\delta_{s,i}(\alpha)$ для различных затеняемых элементов КА на освещенном участке испытательного витка составляет примерно от 0.14 до 0.28. Дополнительным фактором, порождаемым панелями имитатора Земли, является незначительная паразитная засветка некоторых элементов КА, обусловленная рассеянием излучения на элементах конструкции имитатора.

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Термовые испытания космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.—202 с.
2. Колесников А. В. К вопросу о принципах моделирования поля интенсивности теплового излучения планет // Космич. исследов. — 1979.—17, вып. 1.—С. 146—150.
3. Колесников А. В. Методика расчета интенсивности излучения линейчатых излучателей имитаторов внешних тепловых потоков // Инж.-физ. журнал.—1983.—45, № 2.—С. 152—153.
4. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов и окружающей его среды / Под ред. Г. И. Петрова. — М.: Машиностроение, 1971.—382 с.

5. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.—224 с.
6. Разработка пакета программ с автоматизированной системой формирования оптико — геометрических моделей для расчета теплообмена КА / Кислов А. М., Романенко В. Г. // Научно-технич. отчет СКТБ по КТ ФТИНТ НАН Украины. — Харьков, 2000.—108 с.
7. Ульянин Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы. — М.: Машиностроение, 1980.—208 с.
8. Donato M., et al. Design of an orbital heating simulator using IR techniques // J. Environ. Sci.—1987.—30, N 3.—P. 45—49.

THE SIMULATOR OF THE EARTH'S RADIATION FOR THERMO-VACUUM TESTS OF SPACECRAFTS

R. V. Gavrilov, A. M. Kislov, Yu. A. Melenevsky, A. I. Tserkovny

We developed the simulator of the Earth's radiation as a system of panels with line IR-emitters which are heated up by an electric current. The panels of emitters are fixed on the support-rotary facility. Together with a satellite the panels make preset turns with respect to the radiation flux from the solar simulator. The simulator reproduces on satellite elements summarized density of the absorbed fluxes of the Earth's emission and reflected sunlight from the Earth on the preset revolutions of the orbit. The results of our calculation of design parameters of the simulator are given.

УДК 523.72: 629.7.018

© Р. В. Гаврилов, А. М. Кислов, В. Г. Романенко

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ В ИМИТАТОРАХ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Розроблено методику комп'ютерного моделювання процесу променістого перенесення у дзеркально-лінзових оптических системах імітаторів сонячного випромінювання. У референтній площині імітатора обчислюються розподіл освітленості та її нерівномірність, середня освітленість і максимальний кут розбіжності світлового потоку. Наведено результати розрахунку імітатора з багатомодульною оптичною системою.

В имитаторах солнечного излучения (ИСИ) высокого качества используются сложные зеркально-линзовые оптические системы, которые содержат: блок источников излучения, коллекторные отражатели, оптический интегратор, входное окно вакуумной камеры, коллимационное зеркало [1, 4, 6, 8, 9]. Возможны варианты оптических систем без интегратора и/или коллимационного зеркала, многомодульные схемы с индивидуальными оптическими системами. Источником излучения в отдельном световом канале чаще всего служит короткодуговая ксеноновая лампа, установленная в фокусе эллип-

соидного отражателя. В ИК-имитаторах источниками излучения могут быть лампы накаливания и нагреватели с отражателями.

В качестве контрольной зоны, для которой указываются определенные характеристики ИСИ, рассматривается область заданного диаметра (мишень) в референтной плоскости имитатора. В области мишени требуется обеспечить основные характеристики светового потока: спектральный состав, близкий к солнечному, заданную среднюю освещенность, допустимые неравномерность освещенности и угол расходности пучка (максимальный угол между све-

товыми лучами и осью пучка). При тепловых испытаниях космических аппаратов спектральный состав излучения может соответствовать спектру ксеноновой лампы или инфракрасного излучателя.

Для компьютерного моделирования процесса переноса лучистых потоков в ИСИ с зеркально-линзовыми оптическими системами и расчета характеристик потока излучения в заданной области референтной плоскости разработана программная система MIRAGE. В состав MIRAGE входят программы SIGMA, SIMPL и OPTOS. Программа SIGMA предназначена для формирования оптико-геометрических моделей ИСИ, которые содержат элементы с граничными поверхностями не выше второго порядка. Оптико-геометрическая модель строится из набора поверхностных и объемных базовых конструктивных единиц (конструктивов), записанных в программе. База данных включает все конструктивы пакета программ TRASSA [5], а также дополнительные оптические конструктивы: элементы параболоида, эллипсоида и гиперболоида, линзовые элементы с плоскими и сферическими поверхностями, решетчатые ослабители излучения. Многогранные конструктивы программа SIGMA автоматически разбивает на элементарные грани и формирует в определенном формате записи для этих граней в виде внутренних упорядоченных структур. Эти структуры используются программой SIMPL для моделирования лучистого переноса в оптической системе ИСИ.

Для всех граней конструктивов задаются оптические характеристики поверхностей и сред, ограничиваемых этими поверхностями: коэффициенты поглощения a и зеркального отражения r_s непрозрачных граней, коэффициенты преломления n и экстинкции κ оптического материала линзовых элементов, коэффициенты диффузного $r_{\text{диф}}$ и зеркального r_s отражения рабочих поверхностей для линзовых элементов. На непрозрачных гранях учитываются также диффузное отражение ($r_{\text{диф}} = 1 - a - r_s$). Для рассматриваемого спектрального диапазона задаются средние значения оптических характеристик. Процессы переноса излучения в различных спектральных диапазонах моделируются отдельно.

Программа SIMPL разработана для моделирования методом Монте-Карло процесса переноса излучения от источника в область мишени референтной плоскости и расчета параметров пучка в этой области. На грани-источнике моделируется диффузный (ламбертовский) закон эмиссии излучения в конусе с углом полураствора $\alpha = 0 \dots 90^\circ$ и равномерное распределение плотности потока. Для источника в виде диска распределения плотности потока и угла излучения представляются в виде

кубических интерполяционных сплайн-функций радиуса точки испускания. Преломление лучей на поверхностях линзовых элементов моделируется законом Снеллиуса. Поглощение энергии преломленного луча в линзовом элементе вычисляется через длину хода луча в элементе и коэффициент экстинкции материала линзы.

В референтной плоскости имитатора область мишени моделируется конструктивом типа «круг» радиуса Rt с черной рабочей поверхностью и идентифицируется среди других граней оптической системы своим номером t . Мишень разбивается на M концентрических колец шириной $\Delta r = Rt/M$. Внешний радиус k -го кольца $r_k = kRt/M$, где $k = 1, \dots, M$ ($r_0 = 0$). Если кольцо $k = 1$ (круг) разделить на σ равных секторов (ячеек), то площадь одной ячейки $\Delta F = \pi(Rt/M)^2/\sigma$. Число ячеек в k -м кольце $n_k = \sigma(2k - 1)$, а на всей мишени — σM^2 . При $\sigma = 3$ размер ячейки по радиальной координате (Δr) и средний размер по угловой координате ($\pi\Delta r/3$) приближенно равны. Величина Δr выбирается примерно равной характерному размеру датчика для измерения освещенности мишени.

Поток излучения Φ_t , поглощенный мишенью, определяется выражением

$$\Phi_t = \varphi_{s-t} \Phi_S, \quad (1)$$

где φ_{s-t} — суммарный разрешающий угловой коэффициент между блоком S граней-источников и гранью-мишенью t , Φ_S — суммарный поток излучения с блока S источников.

Освещенность n -й ячейки в k -м кольце мишени равна

$$E(k, n) = \Phi_S \Delta \varphi_{s-t}(k, n) / \Delta F, \quad (2)$$

где $\Delta \varphi_{s-t}(k, n)$ — суммарный разрешающий угловой коэффициент между блоком S граней-источников и ячейкой мишени, $n = 1, \dots, N_k$, $N_k = 3(2k - 1)$.

Среднее значение и средняя квадратичная неравномерность освещенности вычисляются с использованием (1) и (2) по формулам

$$E_{\text{med}} = \Phi_t / (\pi R t^2), \quad (3)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\pi R t^2)^{-1} \Delta F \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^{N_k} (E(k, n) - E_{\text{med}})^2}. \quad (4)$$

Коэффициенты φ_{s-t} , $\Delta \varphi_{s-t}$ вычисляются методом Монте-Карло по схеме со статистическими весами [3, 7] с учетом потерь веса (энергии) лучей на траекториях при отражении от граней системы и прохождении через линзовые элементы.

Угол расходимости для v -й траектории луча ра-

вен $\gamma_v = \arccos|\mathbf{n}_t \cdot \mathbf{v}_v|$, где $|\mathbf{n}_t|$, $|\mathbf{v}_v|$ — направляющие векторы нормали к рабочей поверхности мишени и падающей на нее v -й траектории луча. При моделировании траекторий для всех ячеек $\Delta F(k, n)$ в счетчиках $A(k, n)$ фиксируются максимальные значения угла расходимости

$$\gamma_{\max}(k, n) = \max_v \gamma_v(k, n). \quad (5)$$

Расчетный угол расходимости светового потока для всей мишени равен

$$\gamma = \max_{(k, n)} \gamma_{\max}(k, n). \quad (6)$$

Результаты расчета распределения освещенности представляются в виде: 1) цветограммы, 2) одномерных графиков на концентрических окружностях и заданных радиальных лучах, 3) поверхности, которая изображается в различных ракурсах двумерным кубическим сплайном, 4) таблиц. Распределение угла расходимости (5) приводится в виде таблиц. Для осесимметричной оптической системы результат представляется графиками радиального распределения освещенности (2) и угла расходимости (5). На графиках дополнительно приводятся: среднее значение (3) и средняя квадратичная неравномерность (4) освещенности мишени, экстремальные значения освещенности и угла расходимости (6) светового потока.

Программа OPTOS решает задачу рационального расположения источников излучения или оптических модулей, при котором обеспечиваются допустимые неоднородность распределения освещенности на мишени и угол расходимости светового пучка.

В качестве примера применения программной системы MIRAGE приведем результаты расчета многомодульной оптической системы имитатора без оптического интегратора и коллимирующего зеркала. Рассматривается оптическая система с 19 световыми каналами, схема которой приведена ниже в работе [2, рис. 2]. Источником света служит блок из 19 короткодуговых Хе-ламп, формирующая оптика каждого светового канала включает зеркальный коллектор и плоское зеркало. Коллектор имеет форму пояса эллипсоида вращения, в первом фокусе которого расположена дуга Хе-лампы. Система коллекторов и плоских зеркал направляют потоки излучения на мишень радиуса Rt в референтной плоскости имитатора. Каждый световой канал создает поле освещенности радиуса r_{\max} определенного участка мишени. Все световые каналы создают результирующее поле освещенности с некоторой неоднородностью ΔE , которая зависит от взаимного расположения световых каналов (или центров свето-

вых пучков на мишени). Требуется определить такое взаимное расположение световых каналов, при котором обеспечивается минимальное значение ΔE .

При решении сформулированной задачи исходим из того, что задана создаваемая одним световым каналом освещенность $E_0(r)$ в функции радиуса r ($0 \leq r \leq r_{\max}$). Пример радиального распределения относительной освещенности $E_0 = E_0(r)/E_{0,\max}$ на мишени, вычисленного с помощью программы MIRAGE, приведен на рис. 1.

Рациональное расположение световых каналов реализуется при их «плотной» упаковке, когда центры пучков совпадают с центрами гексагонов, покрывающих мишень радиуса Rt . Тогда поле освещенности мишени определяется выражением

$$E(x, y) = E_0(\sqrt{x^2 + y^2}) + \sum_{k=1}^{18} E_0(\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}), \quad (7)$$

где $x_k = x_k(R)$, $y_k = y_k(R)$ — координаты центра k -го гексагона в зависимости от радиуса R описанной вокруг него окружности. Неоднородность поля освещенности выражается как функция R и Rt в виде

$$\Delta E(R, Rt) = \max_{x^2 + y^2 \leq R^2} E(x, y) - \min_{x^2 + y^2 \leq R^2} E(x, y). \quad (8)$$

Так как поле освещенности (7) имеет 12 плоскостей зеркальной симметрии, поиск экстремальных значений функции $E(x, y)$ достаточно провести в секторе с угловым размером 30° . Оптимальный радиус R_{opt} , минимизирующий целевую функцию (8), и максимальный радиус мишени Rt_{\max} подлежат затем определению в результате двумерного поиска в прямоугольнике $0.5 \leq R/r_{\max} \leq 0.8$, $2 \leq Rt/r_{\max} \leq 2.5$.

Среднее значение освещенности мишени и средняя квадратичная неравномерность освещенности выражаются соответственно в виде

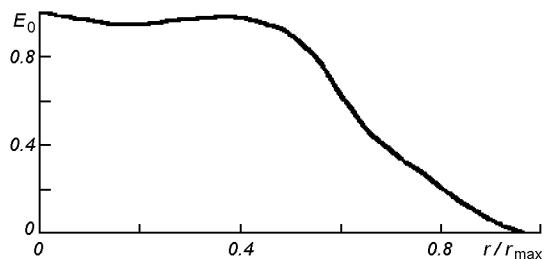


Рис. 1. Распределение относительной освещенности по радиусу мишени

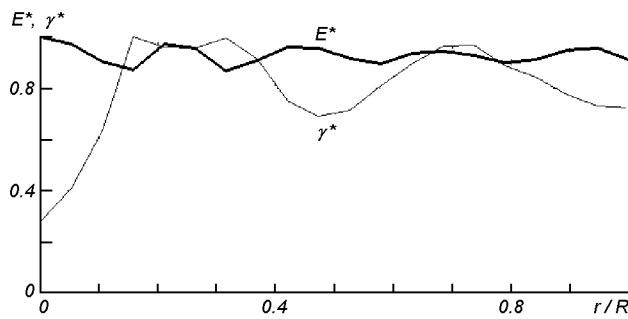


Рис. 2. Распределение освещенности по радиусу в референтной плоскости

$$E_{\text{med}} = (\pi R t^2)^{-1} \iint_{x^2 + y^2 \leq R t^2} E(x, y) dx dy,$$

$$\overline{\Delta E} = \sqrt{(\pi R t^2)^{-1} \iint_{x^2 + y^2 \leq R t^2} (E(x, y) - E_{\text{med}})^2 dx dy}.$$

На рис. 2 приведены распределения освещенности $E^*(\rho) = E(\rho)/E_{\max}(\rho)$ и угла расходимости пучка $\gamma^*(\rho) = \gamma(\rho)/\gamma_{\max}(\rho)$ в зависимости от радиуса мишени $\rho = r/Rt$, $\gamma_{\max}(\rho) \approx 4^\circ$.

Поверхность мишени радиуса $Rt = 1000$ мм разбивалась на $M = 20$ колец, так что общее число ячеек размером 50×50 мм равно 1200. Освещенности $E(r_k, \varphi)$ проинтегрированы по углу $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ в каждом k -м кольце плоскости мишени ($k = 1, \dots, 20$). Расчетное значение среднего квадратичного отклонения освещенности от среднего значения $\Delta E \approx \pm 8\%$.

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.— 143 с.
2. Гаврилов Р. В., Меленевский Ю. А., Конюхов С. Н. и др. Стенд для тепловакуумных испытаний космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.— С. 42—46.
3. Кислов А. М., Романенко В. Г. Применение метода Монте-Карло для расчета молекулярных и лучистых потоков в системах сложной конфигурации. — Харьков, 1980.— 36 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 12-80).
4. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г. И. Петрова. — М.: Машиностроение, 1971.—382 с.
5. Разработка пакета программ с автоматизированной системой формирования оптико-геометрических моделей для расчета теплообмена КА МС-1-ТК-ТВ: Научно-техн. отчет / А. М. Кислов, В. Г. Романенко — Харьков: СКТБ ФТИНТ НАНУ, 2000.—120 с.
6. Рымов А. И. Имитатор солнечного излучения // Светотехника.—1989.—9.—С. 4—6.
7. Соболь И. М. Численные методы Монте-Карло. — М.: Наука, 1973.—312 с.
8. Barter R. E., Riise H. N., Miller C. G. Solar Simulators at the Jet Propulsion Laboratory // Appl. Opt.—1970.—9, N 5.— P. 1068—1074.
9. Brinkmann P. W. The European large space simulator comes into operation // ESA Bull.—1987.—50.—P. 19—23.

COMPUTER SIMULATION OF RADIANT FLUXES IN SOLAR SIMULATORS

R. V. Gavrilov, A. M. Kislov, V. G. Romanenko

We developed a technique for computer simulation of radiant transfer process in mirror-lens optical systems of solar simulators. In the given area of the reference plane of a solar simulator the distribution of irradiance and its non-uniformity as well as average irradiance and maximal angle of divergence of beam are calculated. Our results of calculation of the simulator with multi-modular optical system are presented.

© Р. В. Гаврилов¹, Ю. А. Меленевский¹, С. Н. Конюхов²,
В. И. Драновский², М. И. Кошкин², Ю. С. Алексеев³,
А. С. Коротков³, В. А. Щеголь³, В. А. Соколов³,
В. В. Еременко⁴, В. Г. Комаров⁵, Е. И. Махонин⁵

¹Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з кріогенної техніки ФТІНТ НАНУ, Харків

²Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

³Державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод», Дніпропетровськ

⁴Фізико-технічний інститут низьких температур НАНУ, Харків

⁵Національне космічне агентство України, Київ

СТЕНД ДЛЯ ТЕПЛОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Стенд тепловакуумных випробувань КА призначено для імітації космічного вакууму, холодного космічного простору, оптичного випромінювання Сонця і Землі, включаючи альбедо с метою визначення впливу цих факторів на тепловий режим конструкції і апаратури КА, розміщеного в кріовакуумній камері стенду на опорно-поворотному вузлі, що імітує рух КА по заданій орбіті навколо Землі.

Введение. Неодинаковость нагрева отдельных частей КА в полете, изменение во времени коэффициентов поглощения и степени черноты наружных его поверхностей, учет рассеивания внутренней энергии — все это требует специальных, подчас весьма сложных экспериментальных исследований, которые целесообразно проводить при наземной отработке летательных аппаратов с помощью специальных установок, в той или иной степени имитирующих условия космического пространства.

Широко известные большие имитаторы Солнца с диаметром пучка 6 и более метров. Такие стенды очень дорогие не только в изготовлении, но и в эксплуатации. Для испытаний больших КА они, конечно, необходимы. Но в последнее время наблюдается большой интерес к малым КА. Для их тепловакуумных испытаний необходимы более простые и дешевые (особенно в эксплуатации) стенды. Все эти тенденции учтены в предлагаемой разработке. При этом обеспечивается достаточно близкая имитация реальных условий полета КА. Еще одной отличительной особенностью описываемого стенда является его мобильность. Стенд установлен на железнодорожных тележках, что позволяет при необходимости, несмотря на большой вес (около 20 т), установить стенд в удобном для испытания месте.

Сост ав ст енда. Испытываемый космический аппарат устанавливается внутри криовакуумной камеры стендового комплекса на опорно-поворотном устройстве, имитирующем движения КА в

орбитальном полете вокруг Земли. В состав СТВИ входят имитаторы космического пространства и системы, обеспечивающие его работоспособность при проведении тепловакуумных испытаний космических аппаратов:

- вакуумная камера;
- имитатор «холодного» космического пространства;
- система вакуумирования;
- имитатор солнечного излучения;
- имитатор излучения Земли;
- опорно-поворотное устройство;
- система управления, измерения и обработки параметров аппаратуры стендов тепловакуумных испытаний и система контроля параметров элементов конструкции КА.

На рис. 1 показана упрощенная схема компоновки стендового комплекса для тепловакуумных испытаний космических аппаратов.

Вакуумная камера. Вакуумная камера предназначена для создания замкнутого герметичного пространства, в котором имитируются внешние условия функционирования КА на орбите (вакуум, излучения Солнца, Земли, холода космического пространства), а также для размещения в ней истыковки испытываемого объекта (КА или его теплового макета) с узлами, агрегатами и другими системами и оборудованием. Обеспечена возможность визуального наблюдения за процессом испытаний КА. Внутренние размеры вакуумной камеры:

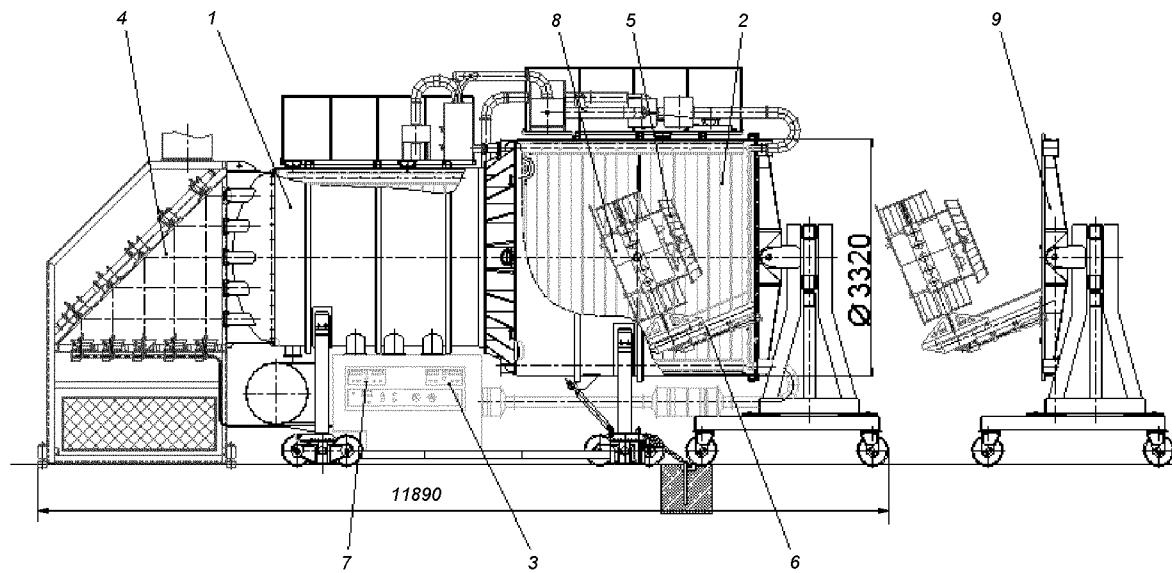


Рис. 1. Схема компоновки стендового комплекса для тепловакуумных испытаний космических аппаратов: 1 — вакуумная камера, 2 — имитатор «холодного» космического пространства, 3 — система вакуумирования, 4 — имитатор солнечного излучения, 5 — имитатор излучения Земли, 6 — опорно-поворотное устройство, 7 — система управления, измерения и обработки параметров аппаратурой стенда тепловакуумных испытаний и система контроля параметров элементов конструкции КА, 8 — испытываемый КА, 9 — положение крышки камеры при установке КА

- диаметр до 3280 мм;
- длина 6725 мм.

Конструкция вакуумной камеры и опорно-поворотного устройства обеспечивает возможность монтажа КА с габаритами до 2 м и массой не менее 200 кг. Расположение вакуумной камеры стенда — горизонтальное. Плоская отстыковываемая крышка камеры, вместе со смонтированным на ней опорно-поворотным устройством, может перемещаться на тележке по рельсовому пути на расстояние до 3 м для установки КА (рис. 2).

Имитатор «холодного» космического пространства. Модель космического пространства, полностью поглощающего тепловую радиацию КА и ничего не излучающего на его поверхность, представляет среду с коэффициентом поглощения, равным единице при температуре, близкой к 0 К. Практически такая модель выполнена в виде экранов, помещенных в вакуумную камеру и окружающих испытуемый объект (рис. 3). Изнутри экраны покрыты краской, имеющей коэффициент поглощения для радиации Солнца и Земли не менее 0.90 ($\lambda = 0.3\ldots4$ мкм); снаружи экраны имеют большой коэффициент отражения. Покрытие экранов обладает низкой упругостью паров, стойкостью при облучении ультрафиолетовой радиацией, постоянством во времени коэффициента поглощения при

изменениях температуры. Достаточно хорошая имитация космического пространства достигается путем охлаждения экранов жидким азотом (77—100 К). В этом случае собственное излучение внутренней поверхности экрана не превышает 0.5 % излучения КА (при средней его температуре 300 К и при отношении излучающих поверхностей экрана и спутника не менее 2:1).

Вакуумно-откачная система. Система вакуумирования, состоящая из безмасляной форвакуумной системы и высоковакуумной системы из криогенных и турбомолекулярных насосов, обеспечивает выход на рабочий режим до остаточного давления в вакуумной камере не выше 1 мПа за время не более 10 ч. Контроль остаточного газового состава, включая газовыделение исследуемого КА, осуществляется масс-спектрометром.

Имитатор солнечного излучения. Имитатор солнечного излучения обеспечивает в пятне облучения диаметром 2.2 м среднюю освещенность 1300...1500 Вт/м² в интервале длин волн 0.3...2.5 мкм. Спектральное распределение соответствует спектру излучения Хе-лампы, близкому к солнечному спектру. В области референтной плоскости диаметром 2 м средняя квадратичная неравномерность освещенности менее 10 %, угол расходимости потока излучения менее 5°. Оптическая

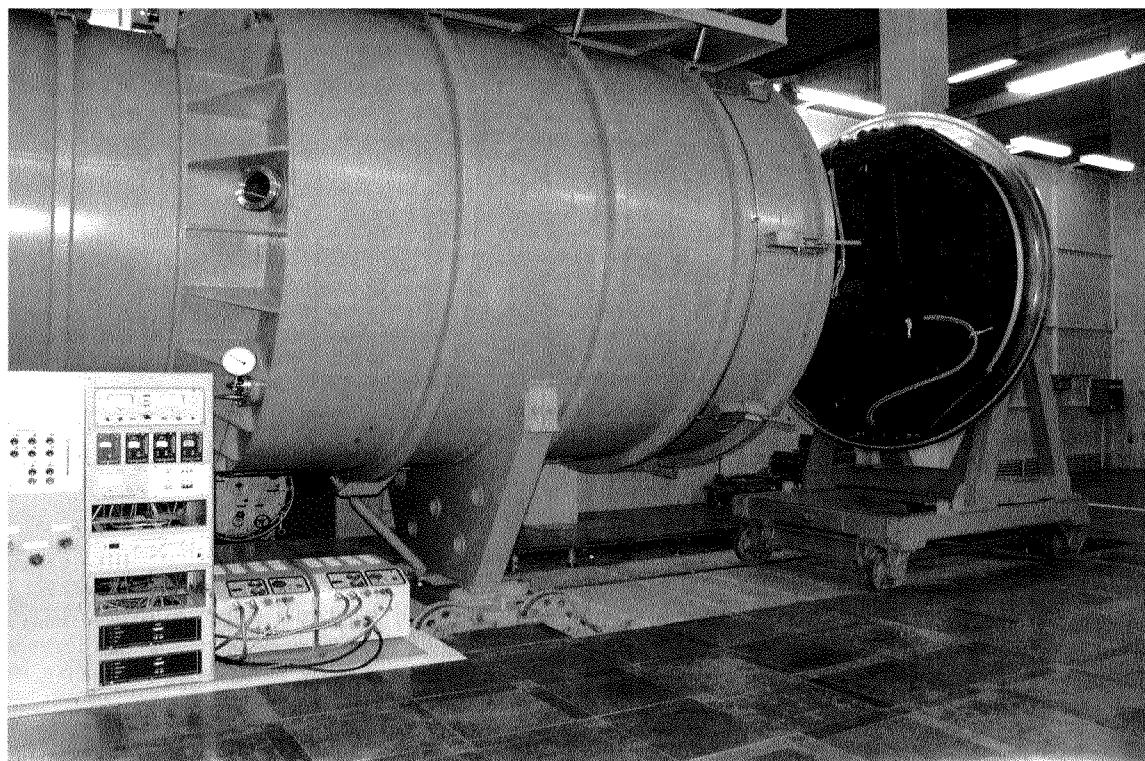


Рис. 2. Вакуумная камера с открытой крышкой

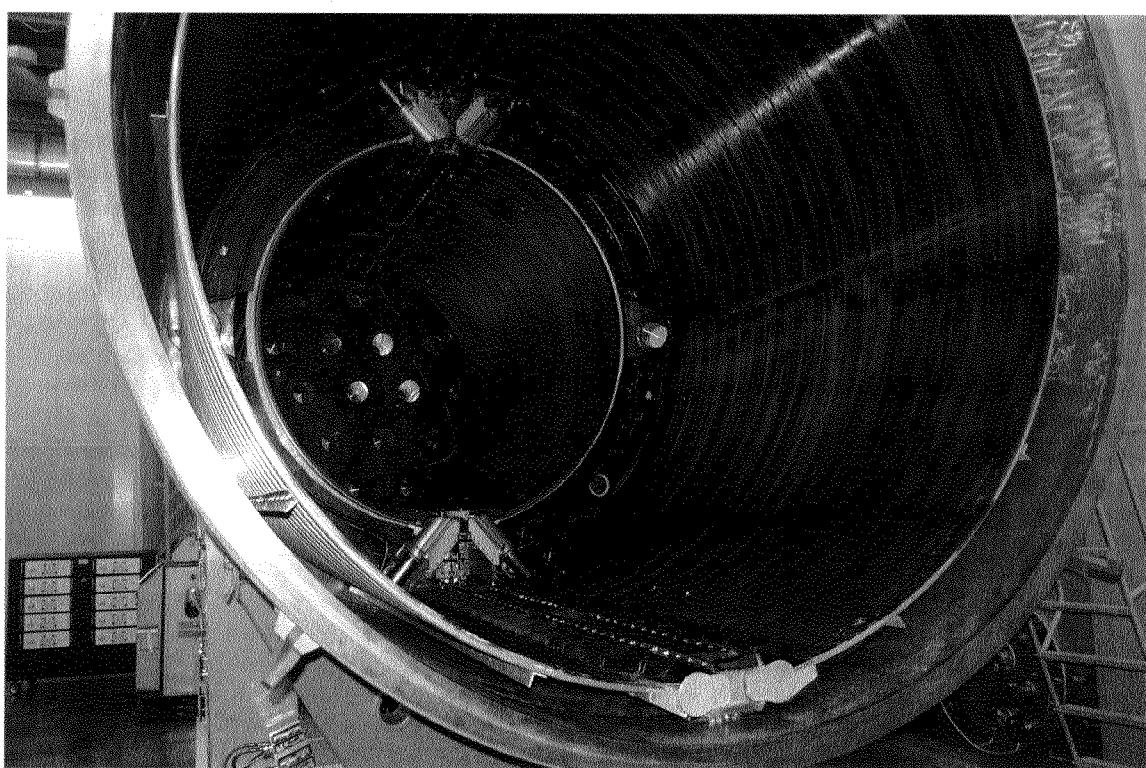


Рис. 3. Азотные экраны камеры

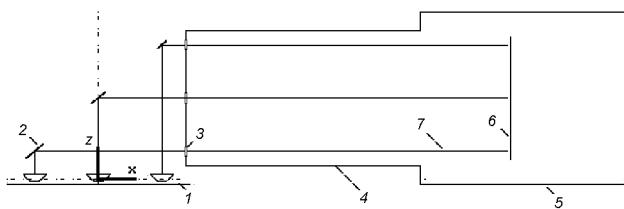


Рис. 4. Схема компоновки трех световых каналов: 1 — ламповый модуль, 2 — плоское зеркало, 3 — входное окно, 4 — камера-1: длина 3400 мм, диаметр 2200 мм. 5 — камера-2: длина 3050 мм, диаметр 3280 мм

система имитатора построена по многомодульной схеме и содержит 19 световых каналов. Световые каналы имеют наиболее простую оптическую схему без интегратора и коллимационного зеркала. Каждый световой канал включает: короткодуговую Хелампу мощностью 5 кВт, зеркальный эллипсоидный отражатель, плоское зеркало, входное окно вакуумной камеры (пластина или линза из кварца). На рис. 4 показана схема компоновки трех световых каналов оптической системы имитатора. Распределения освещенности $E(\rho)/E_{\max}$ и угла расходимости $\gamma(\rho)/\gamma_{\max}$ по радиусу ρ приведены выше в работе [2, рис. 2].

Имитатор излучения Земли подробно описан в работе [1]. Он предназначен для облучения поверхностей КА управляемым потоком ИК-излучения. На элементах КА воспроизводится суммарная плотность поглощенных потоков собственного и отраженного солнечного излучения от Земли на рассматриваемых витках орбиты. Угловое распределение натурных потоков излучения от Земли, падающих на элементы КА, не воспроизводится.

Имитатор представляет собой систему панелей с дискретными линейчатыми излучателями, которые нагреваются электрическим током. Отличительной особенностью имитатора является то, что панели излучателей закреплены на опорно-поворотном устройстве и вместе с КА совершают программные повороты относительно потока излучения от имитатора Солнца. Это позволяет воспроизводить в наземных испытаниях нестационарные тепловые режимы КА на витке при согласованном изменении поглощенных его элементами потоков излучения от имитаторов Земли и Солнца. Все панели разделены на три секции, в каждой секции излучатели имеют свою, но одинаковую температуру. Каждая секция имеет измеритель температуры. Сигналы от них поступают в систему управления, которая поддерживает требуемые значения температуры каждой секции в зависимости от режима испытаний и

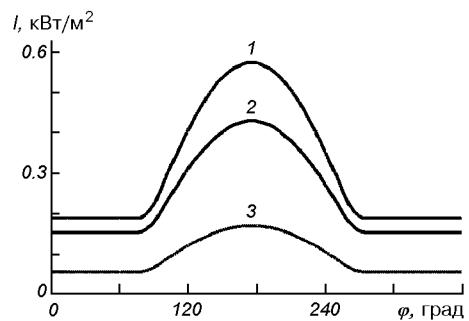


Рис. 5. Пример циклограммы работы имитатора Земли: 1 — облученность установочной плиты, 2 — панелей солнечных батарей, 3 — тепловых экранов

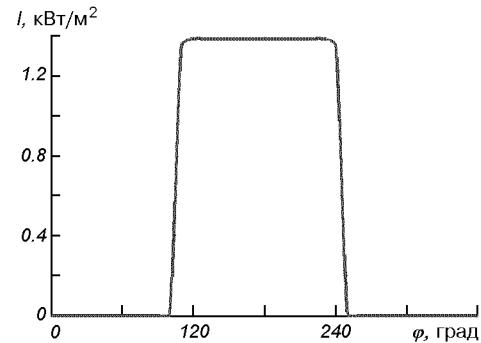


Рис. 6. Пример циклограммы работы имитатора Солнца

имитации взаимного расположения Солнца, Земли и КА на расчетной орбите. При имитации облученности КА на освещенных участках орбиты обеспечивается плотность теплового потока от Земли до $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Приведем для примера некоторые характеристики облучения имитаторами излучения Земли и Солнца микроспутника при его испытаниях в тепловакуумной камере. Микроспутник имеет форму параллелепипеда с четырьмя панелями солнечных батарей [1, рис. 1]. В орбитальном полете продольная ось микроспутника направлена в надир. Орбита солнечно-синхронная с наклонением $i = 98.06^\circ$, период обращения 98 мин. Рассматривается виток, для которого угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце $\beta = 22.5^\circ$; Солнце находится вблизи точки весеннего равноденствия. На рис. 5 приведены распределения плотности потоков от имитатора Земли, падающие на некоторые элементы микроспутника при его вращении в опорно-поворотном устройстве. Циклограмма облучения имитатором солнечного излучения референтной плоскости, в зоне которой расположен микроспутник, приведена на рис. 6.

Опорно-поворотное устройство включает в свой состав электрический привод, кинематический редуктор, поворотную платформу — узел крепления КА, узел укладки кабельной сети и контроллер управления, регулирующий направление и скорость вращения поворотной платформы. Поворотный узел крепления КА обеспечивает ориентацию оси вращения КА относительно светового потока имитатора Солнца под углом 67.5°. Незначительная модернизация опорно-поворотного устройства позволит испытывать КА с другими орбитами.

Система управления, измерения и обработки информации осуществляет регулирование следующими процессами:

- поддержания заданного уровня жидкого азота в секциях радиационного экрана;
- управление масс-спектрометром;
- управление приводом опорно-поворотного устройства по заданной программе;
- измерение температуры и ее поддержание в секциях излучателей имитатора Земли;
- управление световым потоком 19 Xe-ламп для поддержания заданного светового потока каждой лампы;
- контроль за функционированием всех обеспечивающих систем стенда.

Система контроля параметров элементов конструкции КА обеспечивает измерение температурных

полей испытуемого КА и параметров его функционирования.

Заключение. Стенд установлен в ГП ПО ЮМЗ и в настоящее время осуществляется его эксплуатация по назначению. Результаты испытаний полностью подтвердили правильность выбранных инженерных решений.

1. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Меленевский Ю. А., Церковный А. И. Имитатор излучения Земли для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 35—38.
2. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г. Моделирование лучистых потоков в имитаторах солнечного излучения // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 38—41.

STAND RIG FACILITY FOR THERMO-VACUUM TESTING OF SPACE VEHICLES

R. V. Gavrylov, Yu. A. Melenevskiy, S. N. Konyukhov,
V. I. Dranovskiy, M. I. Koshkin Yu. S. Alekseev,
A. S. Korotkov, V. A. Shogol, V. A. Sokolov,
V. V. Eremenko, V. G. Komarov, E. I. Makhonin

The stand rig facility for thermo-vacuum testing of space vehicles is described. It is intended for simulation of space vacuum, cold space environment, electromagnetic radiation of the Sun and Earth, and the Earth's albedo to determine the influence of those factors on thermal regime of hardware and instruments of the space vehicles.

© Л. С. Чесалин, Г. Н. Застенкер, Е. В. Круковская,
Е. В. Лакутина, В. Н. Луценко, Н. Н. Шевырев

Інститут космічних досліджень РАН, Москва, Росія.

БОРТОВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ РОССИЙСКО-УКРАИНСКОГО ПРОЕКТА «ИНТЕРБОЛ-ПРОГНОЗ» (ВЫСОКОАПОГЕЙНЫЙ СПУТНИК «ИНТЕРБОЛ-3»)

Розглядаються основні вимоги до бортових інформаційних систем, принципово відмінні від вимог до систем керування; наводяться варіанти рішень для підготовки випробувальних комплексів наукової апаратури космічного апарату, приділяється увага можливостям перепрограмування обработного комплексу; обговорюється варіант організації обміну даними на борту супутника із використанням добре відпрацьованих мережевих рішень; розглядаються засоби забезпечення гнучкості системи у процесі льотного експерименту.

Российско-Украинский проект «Интербол-Прогноз» предусматривает вывод на орбиту системы космических аппаратов для изучения физических параметров окружающей среды. Ключевым пунктом проекта является совместное рассмотрение результатов измерений характеристик межпланетной среды («верхний этаж» космической системы) и околоземного космического пространства («нижний этаж»).

Измерение различных параметров (магнитного поля, плазмы солнечного ветра, энергичных частиц в межпланетной среде, электрического и магнитного полей, волн и частиц в верхней магнитосфере Земли) выполняется различными научными приборами. Широкий набор приборов позволяет получить комплексную картину состояния околоземного пространства и, в частности, определить свойства солнечного ветра, ответственного за многие процессы в магнитосфере Земли. Предположительный состав объектов космического эксперимента, их траектории, устанавливаемые комплекты физических приборов и измеряемые параметры космического окружения Земли описаны в работе [3].

Эффективность исследований околоземного пространства и адекватность оценки его влияния на Землю в значительной степени определяются количеством собранных и обработанных экспериментальных данных. Этим вопросам посвящена данная статья.

В ходе выполнения международного космического проекта «Интербол» [1], была получена уникальная информация в объеме, превышающем общий объем данных от всех ранее выполненных российских космических экспериментов в области солнечно-земной физики. Существенным звеном

комплекса информационного обслуживания этих проектов являлась система сбора научной информации ССНИ, подготовленная специалистами ИКИ [5, 6]. Именно она обеспечила получение большей части данных и возможность гибкого управления ими на всех этапах летного эксперимента, что в значительной степени определило успех проекта.

Система ССНИ представляла собой высоконадежную вычислительную систему с накопителями информации на жестких магнитных дисках и твердотельной памяти. При разработке и изготовлении системы ССНИ авторами были сформулированы и применены требования к надежности информационных систем поддержки научного эксперимента, (принципиально отличающиеся от требований к управляющим бортовым системам) и сформулировано понятие живучести системы сбора научных данных. Основное отличие в требованиях связано с тем фактом, что для управляющих систем отдельная ошибка в принципе может вести к катастрофическим последствиям, а подобная ошибка в системе сбора данных практически не должна сказаться на результатах эксперимента. Соответственно построение системы сбора по тем же принципам, что и системы управления, приведет к неоправданному усложнению системы и повышению ее стоимости или к значительному снижению функциональных возможностей системы.

Именно поэтому многие классические для систем управления решения нерациональны для информационных систем. Например, троирование устройств с голосованием в этом случае неэффективно. Действительно, вместо троирования одного и того же

действия (например, трехкратного запоминания данных) лучше выполнить две дополнительные задачи (запомнить втрое больше данных, снабдив их контрольными суммами). Таким образом, при отказе или сбое может быть потеряна только часть результатов (скажем, не получен один набор данных из трех), тогда как при троировании даже при отсутствии ошибок объем сохраняемых данных втрое меньше за счет повторений.

При проведении научного эксперимента наиболее существенной становится именно живучесть системы сбора данных, то есть возможность ее стабильного функционирования, пусть даже с частичным ухудшением характеристик, в процессе полета.

Другим существенным требованием к научной информационной системе является гибкость программного обеспечения системы, позволяющая вносить изменения в режимы ее функционирования во время полета. Использование возможности перепрограммирования системы ССНИ в процессе полета позволило изменить логику обслуживания ряда научных приборов и обеспечить получение данных, которые в противном случае были бы просто утеряны вследствие неподатливой работы этих приборов.

Надежность системы ССНИ обеспечивалась оригинальными схемными и программными решениями, определяющими высокую живучесть системы при весьма ограниченных затратах на ее компоненты. В оборудование было заложено несколько уровней резервирования, переключаемых по командам с Земли, а предусмотренная возможность внесения изменений в программное обеспечение во время работы объекта предоставила дополнительные средства обеспечения надежности и позволила, в частности, минимизировать ущерб от одиночных случайных сбоев, возникавших вследствие прошивания ОЗУ высокoenергичными заряженными частицами.

В системе ССНИ были применены промышленные решения вычислительной техники. Выбранная архитектура позволила обеспечить высокую интегральную надежность системы при использовании относительно дешевых компонентов средней надежности, не предназначенных специально для космических применений, что значительно снизило ее общую стоимость. Космический эксперимент «Интербол» показал высокую эффективность принятых решений и позволил выполнить уже в ходе полета ряд дополнительных действий, не предусмотренных заранее. В ходе летных экспериментов на Хвостовом зонде система ССНИ отработала более 45 000 ч, от научных приборов было получено более 500 гигабит данных. На Авроральном зонде система отработала более 20000 ч, было собрано более 100 гигабит данных.

Однако для проекта «Интербол-Прогноз» использование комплекса ССНИ, аналогичного тому, который применялся на предыдущих спутниках программы «Интербол», оказывается недостаточным (несмотря на гибкость предоставляемых им услуг и значительный объем собираемой информации). Проблема возникает, прежде всего, из-за значительно большей удаленности космического аппарата «Интербол-3» от Земли (около 1.5 млн км вместо 200 тыс. км в проекте «Интербол») и практической невозможности передать все собираемые научными приборами данные (из-за ограничений, на скорость передачи и время передачи информации).

Как следствие, оказывается принципиально необходимым изменение подхода к информационной схеме эксперимента. Действительно, современные приборы выдают в 5–10 раз большие потоки информации, а большее удаление объекта от Земли позволяет рассчитывать только на скорости передачи в четыре раза меньшие, чем раньше. В данной работе предлагается решение проблемы путем создания базы данных и организации программируемой обработки собранной информации непосредственно на борту объекта с последующей передачей результатов на Землю [4, 5, 7].

Таким образом, при непрерывном наблюдении данные могут быть обработаны, и определенные результаты обработки переданы для интерпретации экспериментаторам, хотя весь объем «сырых» данных по-прежнему не будет доступен на Земле.

При этом возможна итеративная обработка данных по мере необходимости. Например, при обнаружении по усредненным результатам представляющего особый интерес временного участка можно запросить более подробную его обработку или передачу всей «сырой» информации за этот период времени.

Следует подчеркнуть, что предлагаемая информационная система отнюдь не является автоматической системой обработки космических данных, но должна обеспечить экспериментатору новый уровень взаимодействия с экспериментом. Предлагаемая организация «летающего» центра хранения и обработки данных позволит логически (виртуально) приблизить интеллект экспериментатора к удаленной экспериментальной площадке путем организации обработки данных на месте их получения по гибким программам.

Предлагаемая система логически разбивается на три иерархических уровня. Раздельная, независимая подготовка каждого из уровней позволяет сократить сроки и общую стоимость разработки. В связи с быстрым развитием вычислительных систем особое внимание уделяется модульности и совместимости различных элементов системы (как на

аппаратном, так и на программном уровне). Предлагаемый вариант построения позволит безболезненно заменить отдельные элементы системы в ходе заключительной стадии подготовки миссии и тем самым обеспечить применение последних достижений вычислительной техники и, в частности, включение максимальной архивной памяти без снижения высокой надежности бортовой системы.

Верхний уровень представляется относительно мощным компьютерным блоком (на 2003 г. — не ниже класса Пентиум 300 МГц; если разработка закончится спустя значительное время, процессор следует заменить более мощным аналогом) и устройствами хранения архива данных. Указанный компьютерный блок предназначен для выполнения интеллектуальной обработки данных и составляет ядро данного предложения, в значительной степени определяющее его ценность и новизну. Принимаются все меры для повышения мощности этого блока, и следовательно, функциональных возможностей обработки. Однако, несмотря на важную идеологическую роль, этот блок работает на правах отдельного прибора, не отвечает за жизнеспособность космического аппарата и, вероятно, не резервируется. Возможно, его функции в случае необходимости сможет частично взять на себя один из приборных процессоров.

На верхнем уровне находятся также основные устройства хранения архивных данных. Как уже говорилось, в них предполагается хранение значительной части данных, полученных всеми приборами в максимально информативных режимах за все время работы (порядка 30 % всех возможных данных миссии). Эти данные обеспечивают успех миссии, потеря значительной части их весьма неприятна. Однако даже при полном отказе архива и интеллектуального процессора мы вернемся к возможностям системы ССНИ вполне успешного проекта «Интербол».

Резервирование обеспечивается применением нескольких накопителей разного типа, обслуживаемых специально разрабатываемой архивной файловой системой слежения за приоритетностью информации. Особенно ответственные данные (например, копии рабочих программ отдельных приборов) хранятся в нескольких копиях на разных накопителях. Подчеркнем, что забота об организации архива полностью лежит на его управляющей системе, от пользователя требуется только указание приоритета хранения соответствующей части информации.

На среднем уровне находится высоко надежная система сбора научной информации, имеющая несколько степеней обеспечения живучести и вклю-

чающая память на один-два сеанса сброса научной информации. При необходимости этой системе можно также поручить задачи управления научными приборами объекта. Эта система близка по характеру использования к служебным системам объекта. Прототипом системы среднего уровня может служить система ССНИ предыдущего проекта «Интербол». Конечно, для применения в проекте «Интербол-Прогноз» потребуются определенные изменения и доработки в соответствии с техническими требованиями на объект и переходом на современную элементную базу.

Наиболее «населенным» оказывается нижний уровень системы сбора информации, к которому предлагается отнести микропроцессоры, входящие практически в любой современный прибор. Требования, предъявляемые к этим процессорам, достаточно сильно зависят от потребностей соответствующих приборов. Однако наличие ряда общих задач, выполняемых этими процессорами, позволяет нам предложить потребителям некоторый набор микропроцессорных плат и программных модулей, предназначенных для решения типовых задач управления физическим прибором и сбора поступающих от него данных.

Все процессоры, обеспечивающие информационную поддержку космического эксперимента, должны активно взаимодействовать между собой. Разработка для отдельного проекта специальных интерфейсов безусловно нецелесообразна, так как при создании уникального интерфейса почти всегда возникают ошибки. Мы предлагаем применять в данном проекте хорошо отработанный и использованный (в том числе и на борту космических объектов) сетевой интерфейс Ethernet. Недостатком интерфейса Ethernet можно считать высокое электрическое потребление используемых блоков, но авторы на сегодняшний день не видят конкурентных решений (за исключением применения мало потребляющих приемников и передатчиков сигнала). Тем не менее, вопрос нуждается в дополнительной проработке. В частности, подлежит изучению возможность применения оптоволоконной связи между элементами информационного комплекса на борту аппарата, безусловно перспективной в плане электромагнитной совместимости приборов комплекса, но ранее не применявшейся в подобных целях. Мы рассматриваем также вариант применения (прежде всего для контакта с контрольно-испытательной аппаратурой) инфракрасной связи.

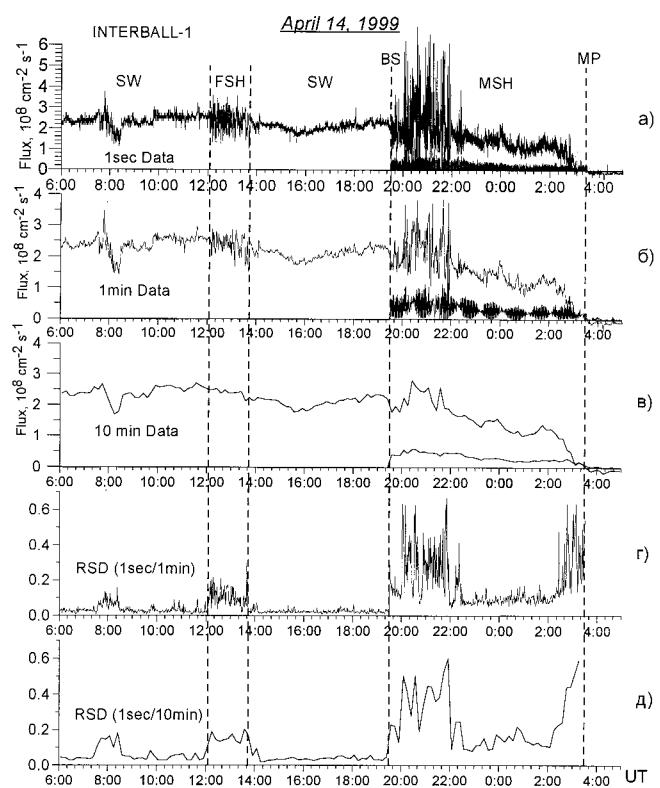
В отличие от прежних наших разработок, где программное обеспечение процессора разрабатывалось специально под задачу с исключительным использованием языка Ассемблера, в данном проекте предлагается применить один из вариантов

операционной системы Unix, которая обеспечивает поддержку стандартных модулей оборудования. Самым преимуществом системы Unix является наличие исходного текста, который необходим для поддержания работы системы в полете и для анализа нештатных ситуаций. Выбор операционной системы допускает применение языка C++ в качестве основного средства программирования, не закрывая возможности включения модулей, написанных на языке Ассемблера.

Следует еще раз подчеркнуть значение гибкости бортовой системы для научных проектов, когда исследования проходят на грани возможного, а задачи могут изменяться в ходе эксперимента. Однако перепрограммирование является весьма ответственной операцией. Например, сбой во время сеанса связи, в котором производится перепрограммирование, может привести к серьезным повреждениям программного обеспечения системы, поэтому обязательно следует предусмотреть возможность восстановления программы после любых изменений. Отметим еще раз, что решение о перепрограммировании и вообще о любом изменении состояния бортовой системы должно приниматься на Земле, а не вырабатываться тем или иным автоматом, который в непредвиденной ситуации может выполнить необратимые действия.

При естественной и очевидной простоте организации архива данных и их научная обработка на борту требует решения ряда технических и организационных проблем, связанных с обеспечением надежного функционирования системы, и даже изменения психологии части экспериментаторов (от подхода коллекционера, собирающего всю информацию для последующей неспешной обработки «когда-нибудь», к творческой позиции собственно испытателя). От экспериментатора требуется актуальная оценка полученной на Земле информации и принятие ответственного решения о судьбе данных на борту. В предлагаемой схеме, в отличие от традиционной, большую роль играет линия передачи информации с Земли на борт. По этой линии передаются указания и программы бортовой системе обработки данных, объем которых превышает объем управляющих команд в традиционной схеме.

Для разработки методики построения бортовой системы авторами подготовлен макетный вариант информационной системы на базе промышленных компьютеров. Макет включает достаточно мощный компьютер на базе микропроцессора Geode для представления верхнего уровня обработки, несколько дисков и твердотельных блоков памяти в качестве архива данных, компьютер на базе Intel 486 с диском для имитации ССНИ и несколько микро-



Измерения потока ионов при прохождении спутником «Интербол-1» последовательно нескольких областей межпланетной среды и магнитосферы

процессоров для представления приборов. С помощью этого макета проведена модельная обработка данных, полученных в ходе проекта «Интербол».

Для проверки предложенной схемы прохождения информации были обработаны данные прибора ВДП, измерявшего полный поток ионов солнечного ветра [2, 9] и прибора ДОК, измерявшего потоки энергичных частиц [8].

Для прибора ВДП обработка сводилась к получению обзорных, усредненных характеристик плазменных потоков и статистических показателей их изменчивости. На рисунке представлены измерения потока ионов при прохождении спутником «Интербол-1» последовательно нескольких областей межпланетной среды и магнитосферы — солнечного ветра (SW), форшока (FSH), снова солнечного ветра (SW), ударной волны (BS), магнитослоя (MSH) с двумя уровнями колебаний и магнитопаузы (MP). Панель а — измерения с разрешением 1 с от двух различно расположенных датчиков (объем данных — 5.0 Мбайт); панели б и в — усреднение тех же данных за 1 мин. и за 10 мин. (объем 120 и

12.5 Кбайт соответственно). Панели *г* и *д* — относительные среднеквадратичные отклонения (RSD) на одноминутном и десятиминутном интервалах.

Для изучения динамики солнечного ветра и магнитосферы наибольшее значение имеет определение моментов времени и пространственного расположения переходов между различными структурными областями, выполняемое наиболее точно по измерениям с наибольшим разрешением (в нашем примере — по ежесекундным измерениям).

Однако, как показало моделирование, резкие изменения уровня RSD позволяют индицировать прохождение интересных событий или границ и тем самым определить, какие части записанной информации наиболее интересны для передачи в полном виде. При этом прохождение ударной волны индицируется не только по возрастанию вариаций (RSD), но и, прежде всего, по появлению отсчетов в дополнительном (боковом) датчике — см. сигнал малой амплитуды после 19:30, что отчетливо видно и на усредненных (и по 1 мин, и по 10 мин) данных. Пересечение магнитопаузы хорошо видно на усредненных данных по спаду потока до нуля (или даже слегка отрицательной величины) и по возрастанию уровня вариаций (RSD) вблизи нее. Возрастание уровня вариаций (например, в области форшока в 12.00 — 14.00) хорошо индицируется по величине RSD (как 1 мин, так и 10 мин), особенно наглядно это видно по 10-мин данным — на самих отсчетах (панель *в*) из-за большого усреднения форшок совсем незаметен, тогда как по RSD (панель *д*) он выделяется очень четко; то же можно сказать и о резких скачках потока (например, около 10:00) и о большом снижении уровня вариаций в магнитослойе (около 22:00).

Таким образом, моделирование работы прибора ВДП показывает возможность существенного (в 30—50 раз) уменьшения объема постоянно передаваемой информации при сохранении (в определенных пределах, разумеется) возможности обнаружения участков пересечения реально наблюдаемых границ или значительных структурных изменений солнечного ветра. Программа для подготовки системы обработки данных подобного прибора может быть разработана на основе имеющегося опыта в основном до запуска космического аппарата.

Конечно, надо иметь в виду, что какие-то явления могут быть пропущены при предложенных критериях, но это является неизбежной платой за сильное уменьшение объема передаваемой информации.

Прибор ДОК позволил его авторам в ходе космического эксперимента «Интербол» помимо регулярных измерений обнаружить и ряд новых эффектов в магнитосфере. Естественно, программа для обнару-

жения подобных, неожидаемых явлений в предлагаемой схеме обработки должна готовиться в реальном масштабе времени по мере оценки получаемых данных. Мы разработали соответствующую программу обнаружения событий и имитировали занесение ее в макетный комплекс командами с Земли. Объем передаваемой информации и для этого исследования уменьшается примерно в десять раз.

Проведенные модельные расчеты подтвердили эффективность предложенной схемы создания бортового архива и бортовой программируемой обработки данных для космического эксперимента «Интербол-Прогноз» (спутника «Интербол-3»), в котором вся собранная с высоким разрешением научная информация не может быть полностью передана на Землю из-за принципиального ограничения пропускной способности радиолинии (и, соответственно, будет потеряна). Предлагаемая организация информационного обеспечения эксперимента позволит с высокой уверенностью выделить по гибким критериям и сохранить наиболее значимую ее часть в соответствии с возможностями радиолинии в предполагаемом объеме порядка 10 %.

1. Галеев А. А., Гальперин Ю. И., Зеленый Л. М., Проект ИНТЕРБОЛ по исследованиям в области солнечно-земной физики // Космич. исслед.—1996.—34, № 4.—С. 339—362.
2. Застенкер Г. Н., Федоров А. О., Шарко Ю. В. и др. Особенности использования интегральных цилиндров Фарадея на спутнике «Интербол-1» // Космич. исслед.—2000.—38, № 1.—С. 23—30.
3. Зеленый Л. М., Тамкович Г. М., Петрукович А. А. и др. Российско-украинский проект «Интербол-Прогноз» для многоуровневого исследования системы солнечно-земных связей. «Верхний этаж» // Третья Укр. конф. по перспективным космическим исследованиям; Кацивели, Крым, 15-19 сентября 2003 г.: Тез. докл. — Киев, 2003.—С. 31.
4. Чесалин Л. С., Лакутина Е. В., Круковская Е. В. Особенности построения интеллектуальной бортовой системы обработки научных данных физического эксперимента // «Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении»: Тез. докл. Выездной семинар; г. Таруса, 25-27 марта 2003 г. — Таруса, 2003.—С. 27.
5. Чесалин Л., Рязанова Е., Лакутина Е. Локализация сбоев бортового процессора в магнитосфере и их автоматическое исправление на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 (авроральный зонд) // Космич. исслед.—1999.—37, № 6.—С. 567—572.
6. Chesalin L. Scientific Information Collection System SSNI. INTERBALL. Mission and Payload // CNES-IKI RAS, 1995.—P. 71—75.
7. Chesalin L., Fedorov A., Lutsenko V., Zastenker G. On-Board Scientific Data Treatment Model // EGS-AGU-EUG Joint Assembly. Nice, France, 6—11 Apr. 2003. — Nice, 2003.—P. 458.
8. Lutsenko V. N., Kudela K. Almost monoenergetic ions near the Earth's magnetosphere boundaries // Geoph. Res. Lett.—1999.—26, N 3.—P. 413—416.
9. Safrankova J., Zastenker G., et al. Small scale observations of magnetopause motion: Preliminary results of the INTERBALL project // Ann. Geophys.—1997.—15, N 5.—P. 562—569.

ONBOARD INFORMATION SERVICE OF THE SCIENTIFIC PROGRAM IN THE RUSSIAN-UKRAINIAN PROJECT INTERBALL-PROGNOZ (HIGH-APOGEE SPACECRAFT INTERBALL-3)

L. S. Chesalin, G. N. Zastenker, Ye. V. Krukovskaia,
Ye. V. Lakutina, V. N. Lutsenko, N. N. Shevrev

The basic requirements to onboard information systems, which are essentially different from the requirements to control systems, are

considered. The architecture of an intellectual onboard information system is proposed. The variants of the decisions for preparation of test complexes of the scientific equipment of a space vehicle are resulted; the attention to possibilities of reprogramming of a processing complex is given. The variant of organization of the data exchange onboard the flight system with application of the well-fulfilled network decisions is discussed. The means of maintenance of flexibility of the system in process of the flight experiment are considered.

© С. В. Абламейко¹, А. А. Кравцов¹,
В. А. Меньшиков², С. В. Пушкарский²

¹Об'єднаний інститут проблем інформатики НАН Білорусії, Мінськ, Білорусія

²Науково-дослідний інститут космічних систем ГНПЦ ім. М. В. Хрунічева, Юбілейне, Московської обл., Росія

**КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ,
ПРОВОДИМЫЕ В РАМКАХ БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИХ ПРОГРАММ
«КОСМОС-БР» И «КОСМОС-СГ»**

Розглядаються напрямки досліджень і розробки, що проводяться в рамках двох білорусько-російських космічних програм. По програмі «Космос-БР» подано основні отримані результати, показано практичне апробування ряду розробок. Освітлено окремі перспективні проекти нової програми «Космос-СГ».

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе известной мировой тенденцией, отмеченной в развитии большинства развитых стран, является быстрое расширение сектора высокотехнологичных услуг, в первую очередь информационных и космических технологий.

Для Беларуси и России применение космических средств имеет особое значение. Специфика их географического положения, размещение ресурсов и социально-экономических объектов таково, что многие серьезные социально-экономические программы могут быть гораздо эффективнее решены при использовании космических средств и технологий, в том числе при решении задач рационального использования природных ресурсов, развития навигации и телекоммуникаций, проведения экологического мониторинга земной поверхности, эффективного использования транспорта и повышения качества гидрометеорологических прогнозов.

Высокие требования к характеристикам применяемой космической аппаратуры, уровню надежности и работоспособности космических объектов в жестких условиях космической среды стимулируют создание высокоэффективных технологий. Космические технологии являются базой для производства высокотехнологичной продукции, конкурентоспо-

собной на мировом рынке, и мощным рычагом развития научно-технического прогресса.

В связи с актуальностью космической тематики, а также в целях восстановления и дальнейшего развития научных, научно-технических и экономических связей в области разработки космических средств и технологий Российской авиационно-космическим агентством и Национальной академией наук Беларуси в 1998 г. была подготовлена совместная научно-техническая программа — «Космос-БР».

ПРОГРАММА «РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ» (ШИФР «КОСМОС-БР»)

Программа «Космос-БР» была утверждена Исполнительным комитетом Союза Беларуси и России (постановлением № 11 от 9 декабря 1998 г.) и запланирована к финансированию из союзного бюджета.

Срок реализации Программы с 1999 по 2002 г.

Государственными заказчиками были определены Российское авиационно-космическое агентство (от Российской Федерации) и Национальная академия

наук Беларуси (от Республики Беларусь); головным исполнителем от России — Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева (НИИ космических систем), от Беларуси — Научно-исследовательское объединение «Кибернетика» НАН Беларуси (после реорганизации в 2002 г. — Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси).

Основные задачи Программы:

- восстановление и эффективное развитие научно-технических и экономических связей в космической деятельности Беларуси и России;
- совместная разработка передовых конкурентоспособных космических технологий;
- применение разработанных космических технологий для совместного создания новых образцов космических средств;
- распространение на международном рынке передовых конкурентоспособных космических средств и технологий.

Структурно программа «Космос-БР» состояла из 10 заданий в рамках следующих четырех основных направлений:

- Создание передовых технологий, методов и аппаратно-программных средств для получения, обработки и доведения до потребителей данных дистанционного зондирования Земли.
- Разработка аппаратно-программных комплексов, направленных на практическое использование спутниковой навигационной информации.
- Разработка систем телеметрического и траекторного контроля за функционированием космических средств.
- Создание новых средств и технологий в области микроэлектроники.

На разных стадиях реализации Программы в выполнении работ участвовали 18 российских и 14 белорусских предприятий.

В результате реализации программы «Космос-БР» были разработаны и созданы:

1. Базовые элементы и технологии экспериментального пункта приема, обработки и распространения космической информации.

2. Стендовый образец мобильного комплекса обеспечения потребителей космической информацией, позволяющий обрабатывать технологии космического мониторинга в зоне возникновения чрезвычайных ситуаций.

3. Ключевые элементы российского (г. Юбилейный Московской обл.) и белорусского (г. Минск) сегментов совместной информационно-навигационной системы контроля и управления движением транспорта на трассе Москва-Минск.

4. Основные элементы экспериментального мо-

бильного телеметрического измерительного пункта на базе малогабаритной приемно-регистрирующей станции и антенно-фидерного устройства нового поколения.

5. Образец нового поколения оптико-электронных средств траекторных измерений для видеонформационного обеспечения пусков ракет космического назначения.

6. Экспериментальные образцы кремниевых и пленочных солнечных элементов, предназначенных для применения в составе перспективных низкоорбитальных космических аппаратов.

7. Опытный образец системы автоматизированного проектирования заказных сверхбольших интегральных схем, предназначенных для использования в бортовой аппаратуре перспективных космических аппаратов.

Программа «Космос-БР», учитывая объемы финансирования и сроки выполнения, имела статус научно-исследовательской работы. Однако в ходе выполнения Программы целый ряд разработок доведен до практического использования.

Так, экспериментальный центр приема космической информации регулярно осуществляет прием и обработку информации со спутников NOAA и «Метеор-ЗМ».

Разработанные технологии по дешифрированию космоснимков используются в интересах МЧС РБ и комитета лесного хозяйства Беларуси. Аппаратно-программный комплекс для сканерного ввода картографической информации используется при составлении кадастров в городском хозяйстве г. Минска.

Разработанная информационно-навигационная диспетчерская система проходит опытную эксплуатацию в Республиканском объединении «Охрана». На данном этапе осуществляется контроль и связь с восемью патрульными машинами, оснащенных навигационными приборами. В перспективе планируется увеличение количества патрульных машин, оборудованных средствами навигации, до 30 единиц.

Оснащенный телевизионным измерительным каналом ВКТ «Висмутин» проходит опытную эксплуатацию на космодроме «Байконур» и характеризуется положительными отзывами.

Опыт выполнения белорусско-российской программы «Космос-БР» подтвердил на практике преимущества интеграции для повышения эффективности использования имеющегося научно-технического потенциала двух государств, в интересах каждого государства в отдельности и Союзного государства в целом.

Примером может быть разработка в рамках про-

граммой «Космос-БР» экспериментального образца пункта приема и обработки космической информации на территории Беларуси. В данной работе российские соисполнители изготавливали антенну и приемную аппаратуру для приема космической информации дистанционного зондирования Земли с российских спутников. В свою очередь, белорусские исполнители разрабатывали технологии и программное обеспечение по обработке космических изображений, по созданию различных тематических карт.

Другим примером может быть использование опыта белорусских исполнителей в создании оптико-электронных средств для траекторных измерений при запуске космических ракет. В рамках программы «Космос-БР» проводилось дооснащение видео-кинотеодолита «Висмутин», высокоточным телевизионным измерительным каналом, разработанным на белорусском предприятии ОАО «Пеленг». Успешно проведенные совместно с российскими соисполнителями испытания устройства на космодроме «Байконур» показали как его высокие технические характеристики, так и эффективность подобного сотрудничества.

Аналогичные варианты плодотворного сотрудничества имели место и при выполнении других заданий программы.

Положительный эффект, полученный от реализации программы «Космос-БР», а также созданный хороший фундамент для дальнейшего развития совместных перспективных исследований по космической тематике позволил Федеральному космическому агентству России и Национальной академии наук Беларуси сформировать новую совместную программу «Космос-СГ».

ПРОГРАММА «РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕРЕСАХ ЭКОНОМИЧЕСКОГО И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА» (ШИФР «КОСМОС-СГ»)

Программа «Космос-СГ» была утверждена Постановлением Совета Министров Союзного государства № 31 от 29 декабря 2003 г. Государственные заказчики и головные исполнители те же, что и в программе «Космос-БР». Программа «Космос-СГ» выполняется в течение четырех лет 2004—2007 гг.

Данная Программа является следующим этапом решения проблем использования космического пространства в интересах Союзного государства. Она затрагивает гораздо более широкий круг вопросов с концентрацией на развитии и практическом приме-

нении результатов, полученных при реализации предыдущей программы «Космос-БР».

Так, изготовленная российскими коллегами в рамках программы «Космос-БР» и установленная в г. Минске станция приема космической информации будет использована в новой программе при создании единой системы обеспечения потребителей Союзного государства информацией дистанционного зондирования Земли. Аналогично модернизированное в Беларуси устройство траекторных измерений «Висмутин» успешно работает на космодроме «Байконур», а в рамках новой программы запланированы работы, которые обеспечат данному устройству качественно новые возможности.

Результаты, полученные при выполнении программы «Космос-БР» по использованию навигационной информации для управления подвижными объектами, в новой программе будут использованы и развиты при создании межгосударственной навигационно-информационной системы повышенной точности.

В выполнении новой программы «Космос-СГ» примут участие более 60 предприятий и организаций России и Беларуси, работающие в области космических средств и технологий.

Учитывая мировые тенденции в развитии космических средств, определены следующие четыре основных направления совместных работ по программе:

1. Разработка элементов единой системы обеспечения космической информацией потребителей Союзного государства.
2. Разработка новой технологической и приборной базы, обладающей повышенным ресурсом эксплуатации для микроспутников дистанционного зондирования Земли нового поколения.
3. Создание упреждающего научно-технического задела по новым материалам, базовым элементам и схемотехническим решениям для различной бортовой аппаратуры, космических телеметрических и измерительных систем.
4. Создание и комплексная отработка элементов наземного сегмента межгосударственной навигационно-информационной системы повышенной точности.

В рамках первого направления планируется совершенствование пункта приема космической информации на территории Беларуси для обеспечения возможного приема высокоскоростных потоков данных дистанционного зондирования Земли с высоким разрешением.

На базе современной телекоммуникационной системы также будет создан территориально-распределенный совместный с Россией архив космических

данных с центральным электронным каталогом.

Ряд проектов направлен на дальнейшее развитие и практическое использование технологий дешифрирования космических снимков для мониторинга нефте-газопроводов, для поиска полезных ископаемых, для диагностики состояния сельскохозяйственных угодий и т. д.

Учитывая возрастающую эффективность использования малых космических аппаратов (МКА), проекты второго направления ориентированы на совершенствование приборной базы для МКА. Это, прежде всего, разработка малогабаритных электронно-оптических камер для съемки земной поверхности в различных спектральных диапазонах, разработка современной озонометрической аппаратуры, лазерно-плазменных двигателей и других приборов.

Новое поколение средств траекторных измерений для космодромов планируется к разработке в рамках третьего направления. При этом предусмотрена как дальнейшая модернизация ВКТ «Висмутина», так и создание новой широкопольной телевизионной регистрирующей станции.

В этом же направлении предусмотрено создание новых теплозащитных материалов для космических аппаратов и надувных тормозных устройств и их исследование на высокочастотных плазмотронах и ускорителях плазмы, позволяющих смоделировать натурные испытания.

Большой интерес представляет также проект, связанный с разработкой аппаратуры для исследования свечения верхних слоев атмосферы, происходящего при обострении сейсмической обстановки на Земле. Результаты таких исследований могут стать основой для методов предсказания землетрясений по свечениям в атмосфере.

На повышение надежности электроники, используемой в космических аппаратах, направлен проект, связанный с разработкой методов увеличения радиационной стойкости интегральных схем космического применения.

Проекты, связанные с созданием средств и систем, использующих спутниковую навигационную информацию (ГЛОНАСС/GPS), сгруппированы в четвертом направлении. Каждое направление программы состоит из ряда заданий.

Система программных мероприятий «Космос-СГ» включает 20 заданий, в том числе по созданию новых технологий использования космической информации дистанционного зондирования Земли, по разработке и изготовлению аппаратуры для малых космических аппаратов нового поколения, по разработке и проведению испытаний приборов экологического назначения, по модернизации и созданию

новых наземных средств обеспечения эксплуатации существующей космической техники с целью повышения ее надежности и эффективности применения. Кроме того, программные мероприятия направлены на создание элементов двух межгосударственных систем, решающих задачи обеспечения потребителей России и Беларуси космической информацией дистанционного зондирования Земли, а также навигационной информацией повышенной точности.

Выполнение программы «Космос-СГ» позволит обеспечить:

- наблюдение, в том числе оперативное, за территорией в целях картографирования, осуществления экологического контроля, мониторинга погодообразующих факторов, контроля лесных пожаров, разлива рек, чрезвычайных ситуаций (аварии промышленных, транспортных и энергетических систем), а также для целей создания кадастров природных ресурсов;
- создание распределенной сети центров приема, обработки и распространения космической информации природоресурсного и экологического мониторинга и предоставление соответствующих услуг различного рода пользователям, в том числе в перспективе и зарубежным;
- решение на качественно новом уровне задач навигационно-временного обеспечения объектов социально-экономического, технического и научного назначения;
- расширение международного сотрудничества, в том числе на коммерческой основе;
- передачу ракетно-космических технологий в другие производственные отрасли в интересах повышения потребительских характеристик продукции и ее конкурентоспособности;
- создание научно-технического, технологического и производственного заделов по перспективной космической технике для обеспечения ее конкурентоспособности на мировом рынке космической продукции и услуг.

SPACE INVESTIGATIONS AND DEVELOPMENTS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE BYELORUSSIAN-RUSSIAN PROGRAMS COSMOS-BR AND COSMOS-SG

S. V. Ablameiko, A. A. Kravtsov, V. A. Menshikov,
S. V. Pushkarskii

The lines of investigations and developments in the framework of two Belorussian-Russian space programs are considered. The main results of the program COSMOS-BR realization are presented together with practical testing of a number of developments concerning the program. Some promising projects of the new program COSMOS-SG are described.

© Н. А. Барабанов¹, Л. М. Бандуристый¹,
Ю. И. Венедиков¹, С. Г. Довгаль¹, Ю. А. Селиванов²,
О. К. Черемных², В. В. Безруких³, Г. Л. Гдалевич³

¹СПКБ «Дискрет» ОНПУ, Україна, Одеса

²Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ, Київ

³Інститут космічних досліджень РАН, Москва

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ В ХОДЕ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «КОЛЬЦО» НА БОРТУ МКС

Пропонується методика вимірювань часу прольоту інжектованих частинок плазми за допомогою приладу «Регіон» під час активного плазмового космічного експерименту «Кільце», запланованого на МКС у 2008 р.

В 2008 г. на Российском сегменте МКС планируется провести космический эксперимент (КЭ) «Кольцо», целью которого является создание высокочувствительных и помехоустойчивых средств измерений электромагнитных флюктуаций в ионосфере Земли, вызываемых процессами, происходящими в земной коре накануне и во время землетрясений, а также другими катаклизмами естественного и искусственного происхождения [3].

КЭ «Кольцо» является активным экспериментом, т.е. в ходе его проведения осуществляется инъекция в ионосферу Земли ионных пучков и их регистрация на борту МКС с помощью детектора, отнесенного от инжектора на определенное расстояние.

В основе эксперимента «Кольцо» лежит зависимость времени пролета ионов от угла оси инжектора относительно силовых магнитных линий, массы ионов, энергии ионов, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля Земли. В результате, измерив время пролета ионов от инжектора до детектора, можно получить информацию о параметрах магнитного поля Земли вдоль орбиты МКС.

Задачи КЭ «Кольцо»:

- изучение динамики ионных пучков в ионосфере Земли;
- исследование механизмов пучково-плазменного взаимодействия и процессов, протекающих в

космической плазме в ходе активных экспериментов;

- отработка методики определения индукции магнитного поля Земли по данным о времени пролета ионов от инжектора до детектора.

Инъекция ионных пучков при проведении КЭ «Кольцо» будет осуществляться поперек силовых линий магнитного поля Земли. При этом ионы должны двигаться по спиралям вокруг силовых линий в направлении, противоположном вектору индукции магнитного поля, и вращаться против часовой стрелки. Известно, что скорость движения ионов от инжектора до детектора зависит от их массы, энергии, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Измерив время пролета ионов от инжектора до детектора, можно получить информацию о параметрах магнитного поля Земли вдоль орбиты МКС. Это и лежит в основе эксперимента «Кольцо» [2, 4].

В качестве инжектора для КЭ «Кольцо» предполагается использовать импульсный источник ионов ксенона или дейтерия.

Для регистрации импульсов потока инжектируемых ионов на определенном расстоянии от инжектора и измерения времени пролета ионов от инжектора до детектора предполагается использовать прибор «Регион» [1], разрабатываемый СПКБ «Дискрет» ОНПУ (г. Одесса) совместно с ИКИ НАНУ-НКАУ (г. Киев) и ИКИ РАН (г. Москва).

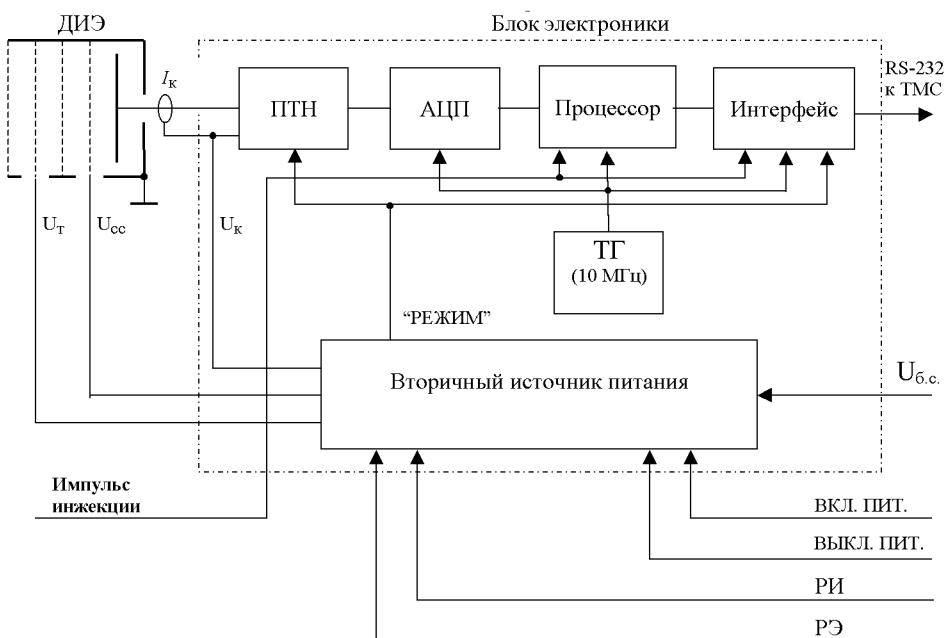


Рис. 1. Структурная схема прибора «Регион»

Кроме регистрации ионов (режим РИ), прибор «Регион» позволяет регистрировать электроны и измерять их время пролета (режим РЭ). Последний режим используется при наземной отработке прибора.

Структурная схема прибора «Регион» приведена на рис. 1. Прибор состоит из детектора ионов и электронов (ДИЭ) и блока электроники (БЭ). ДИЭ предназначен для регистрации импульсов потока инжектируемых ионов или электронов (в зависимости от режима работы прибора). В качестве ДИЭ предполагается использовать плоский анализатор с тормозящим потенциалом (АТП) или полусферический электростатический анализатор. В качестве детектирующего элемента обоих типов анализаторов используется плоский коллектор, ток которого пропорционален потоку частиц, прошедших через анализатор. В докладе рассматривается вариант прибора с АТП.

БЭ содержит всю электронику прибора и предназначен для:

- питания ДИЭ в зависимости от режима РИ или РЭ;
- измерения амплитуды (максимума) импульса тока частиц на коллектор ДИЭ;
- измерения времени пролета частиц от инжектора до ДИЭ;
- формирования информации об измерениях и выдачи ее на телеметрическую систему (ТМС)

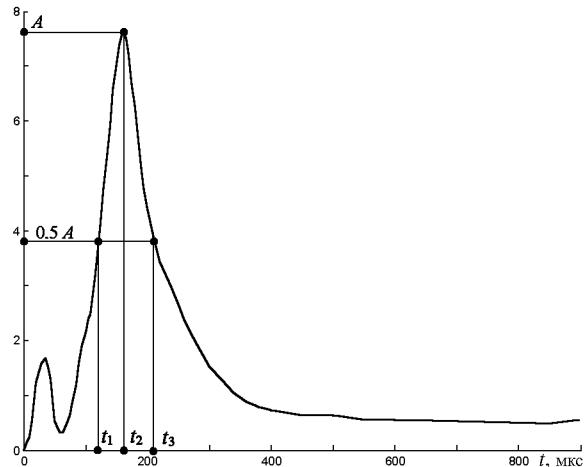


Рис. 2. Импульс тока коллектора ДИЭ при регистрации электронной компоненты инжектируемой плазмы

через последовательный интерфейс в стандарте RS-232;

— питания собственной электроники.

ДИЭ располагается на наружной поверхности РС МКС, а БЭ — внутри гермоотсека. Расстояние между ДИЭ и БЭ может достигать 10 м.

Принцип измерений, реализуемый в приборе «Регион», поясняется рис. 2, где приведен реальный

импульс тока коллектора ДИЭ при регистрации инжектируемых частиц (электронов). Нулевой отсчет времени соответствует моменту начала инжеции. Первый (маленький) пик вызван релятивистскими частицами, образующимися при высоковольтном разряде в инжекторе. Второй основной пик вызван инжектируемыми частицами, образующимися в результате ионизации после разряда. Форма основного импульса обусловлена распределением инжектируемых частиц по скоростям: пик импульса соответствует наиболее вероятной скорости движения от инжектора до детектора, а фронты основного импульса вызваны наличием тепловой скорости частиц, распределенной по закону Максвелла. Кроме «теплового» движения частиц, на крутизну фронтов влияет длина пути пролета частиц, зависящая от параметров магнитного поля Земли. Таким образом, время пролета инжектируемых частиц от инжектора до детектора можно определить только как время между пиком импульса на выходе инжектора и пиком основного импульса, принятого ДИЭ. Для получения информации о движении частиц от инжектора до детектора в приборе «Регион» для каждого периода инжеции измеряются следующие параметры основного импульса тока коллектора ДИЭ:

- амплитуда A ;
- время основного пика t_2 (фактически время пролета частиц);
- отсчеты времени t_1 и t_3 , когда передний и задний фронт импульса пересекают уровень 0.5 от амплитуды A .

Так как формирование порогового уровня 0.5A для текущего периода инжеции в реальном времени проблематично, то в качестве оценки амплитуды в текущем периоде инжеции используется величина амплитуды, измеренная в предыдущем периоде. Значение искомого порога может отличаться от 0.5A в зависимости от изменения амплитуды импульсов от периода к периоду. Поэтому результат измерений для текущего периода инжеции дополняется амплитудой импульса в предыдущем периоде.

Момент начала отсчета временных интервалов импульса в приборе «Регион» задается логическим импульсом инжеции, поступающим с блока питания инжектора. Этот импульс формируется из сигнала контрольного детектора, установленного на выходе инжектора.

ДИЭ представляет собой плоский анализатор с тормозящим потенциалом (АТП), обычно используемый для измерения параметров ионосферной плазмы. Например, аналогичный АТП использовался в комплексе «Альфа-3» на борту аврорально-

го и хвостового зондов проекта «Интербол».

Конструктивно ДИЭ напоминает электронную лампу без накала и катода, и состоит из металлического цилиндрического корпуса, в котором смонтирована система из четырех сеток и плоский коллектор. Первая и третья сетки экранирующие. Они соединены с корпусом ДИЭ. Вторая сетка называется тормозящей. Она позволяет производить отсечку частиц по энергии. Четвертая сетка, расположенная перед коллектором называется супрессорной. Она предназначена для подавления фотот- и вторичной электронной эмиссии с коллектора. Ток коллектора определяется потоком частиц, прошедших систему сеток. В зависимости от знака и величины напряжений на электродах, ДИЭ регистрирует ионы или электроны (см. табл. 1).

Высокое напряжение 180 В тормозящей сетки ДИЭ обеспечивает отсечку фоновых частиц окружающей ионосферной плазмы. Отрицательное смещение -30 В супрессорной сетки относительно коллектора обеспечивает подавление фототока и тока вторичной электронной эмиссии с коллектора.

Конструктивно БЭ выполнен в виде прямоугольного алюминиевого блока, внутри которого установлены печатные платы с электроникой. На передней панели блока расположены разъемы для подключения ДИЭ, питания, телеметрии и управления.

Функционально БЭ состоит из:

- преобразователя «ток — напряжение» (ПТН);
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- процессора;
- интерфейса;
- тактового генератора (ТГ) на 10М Гц;
- вторичного источника питания (ВИП);

ПТН преобразует импульсы тока коллектора ДИЭ в импульсы напряжения. Коэффициент передачи ПТН изменяется в зависимости от режима работы. При измерении импульсов тока инжектируемых ионов коэффициент передачи ПТН равен -20 кВ/А. При регистрации импульсов электронов коэффициент передачи ПТН равен -500 В/А.

Следует отметить, что ПТН выполнен на базе

Таблица 1. Напряжение на электродах ДИЭ относительно корпуса МКС

Напряжение	Значение напряжения, В	
	ионы	электроны
Тормозящей сетки	U_T	+180
Супрессорной сетки	U_{CC}	-40
Коллектора	U_K	-10
Корпуса и экранирующих сеток	\perp	0
		0

быстродействующего операционного усилителя (ОУ) типа AD811 (Analog Devices) с обратной связью (ОС) по току. Этот усилитель имеет низкое входное сопротивление (десятка Ом), шунтирующее емкость входной цепи ПТН, что существенно уменьшает отрицательное влияние этой емкости на частотные и шумовые свойства ПТН. Это позволяет соединять коллектор ДИЭ с блоком электроники (БЭ) с помощью кабеля длиной до 10 м, без существенного ухудшения качества сигнала в сравнении с непосредственным соединением коллектора ДИЭ с входом усилителя. В результате становится возможным размещение БЭ внутри гермоотсека РС МКС. При этом на поверхности МКС размещается только ДИЭ, не содержащий электроники.

ОУ ПТН имеет плавающее двуполярное питание, на общий провод которого (он же общий провод ПТН) подается напряжение U_k относительно общего провода (корпуса) БЭ, электрически соединенного с корпусом ДИЭ и корпусом МКС. Это позволяет задавать необходимое напряжение на коллекторе ДИЭ в зависимости от режима работы прибора путем переключения U_k .

АЦП осуществляет оцифровку импульса напряжения ПТН с частотой преобразования 10МГц, задаваемой тактовым генератором ТГ. В качестве АЦП используется быстродействующий 12-разрядный АЦП AD9220 (Analog Devices).

Процессор производит обработку выходного сигнала АЦП, обеспечивая для каждого периода импульса инжекции:

- измерение амплитуды (максимума) импульса тока коллектора;
- фиксию амплитуды импульса тока коллектора, измеренную в предыдущем периоде;
- измерение интервала времени между импульсом инжекции и максимумом (пиком) импульса тока коллектора (время пролета ионов и электронов);
- измерение интервалов времени между импульсом инжекции и моментами, когда фронты импульса тока коллектора пересекают уровень 0.5 амплитуды в предыдущем периоде.

Запуск процесса обработки происходит при поступлении импульса инжекции и тактируется от ТГ.

Структурная схема процессора приведена на рис. 3. В состав процессора входят:

- три 12-разрядных регистра РГ1...РГ3;
- 16-разрядный счетчик СЧ;
- два компаратора К1 и К2;
- детектор изменений ДИ;
- три 16-разрядных регистра РГ4...РГ6.

Счетчик СЧ осуществляет подсчет импульсов ТГ

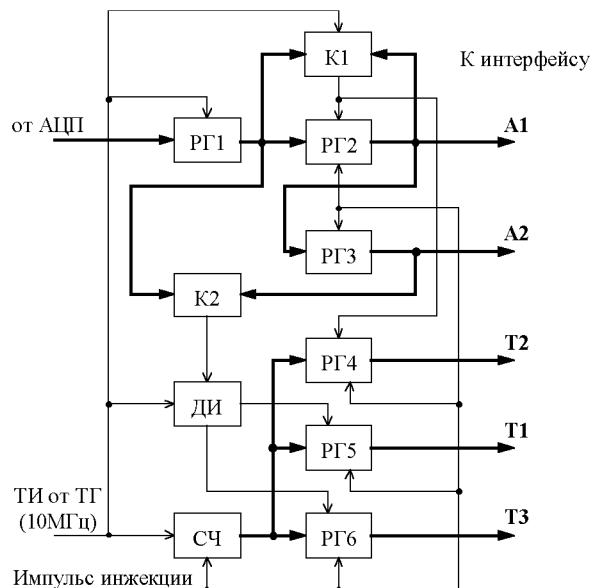


Рис. 3. Структурная схема процессора прибора «Регион»

внутри периода инжекции. Этот счетчик обнуляется в момент прихода импульса инжекции. Таким образом, СЧ является источником временных интервалов.

РГ1 фиксирует выходной код АЦП по заднему фронту импульсов ТГ.

РГ2 и К1 образуют детектор пика (максимума) импульса тока коллектора ДИЭ. РГ2 осуществляет фиксию максимума выходного кода РГ1. При поступлении импульса инжекции РГ2 обнуляется. К1 сравнивает код РГ1 и РГ2. Если код РГ1 больше кода РГ2, то К1 вырабатывает импульс записи в РГ2 кода из РГ1. В результате после пика тока коллектора в РГ2 фиксируется код А1 амплитуды регистрируемого импульса в текущем периоде инжекции. При поступлении очередного импульса инжекции код с РГ2 переписывается в РГ3 и

Таблица 2. Структура телеметрического кадра прибора «Регион»

№ посылки	Наименование данных
1	Маркер начала кадра и режим работы
2...4	Код амплитуды А1
5...7	Код амплитуды А2
8...11	Код временного интервала Т1
12...15	Код временного интервала Т2
16...19	Код временного интервала Т3

Таблица 3. Основные параметры прибора «Регион»

Эффективная площадь коллектора детектора	11 см ²
Ширина диаграммы направленности детектора	±70°
Амплитуда регистрируемых импульсов тока ионов	0.1—100 мкА
Амплитуда регистрируемых импульсов тока электронов	0.01—10 мА
Энергия отсечки фоновых ионов и электронов	180 эВ
Диапазон измерения временных интервалов (времени пика импульсов, времени начала и конца импульсов по уровню 0.5 амплитуды)	0—6.55 мс
Дискретность измерения временных интервалов	0.1 мкс
Допустимый период повторения инжектируемых импульсов	8...1000 мс
Допустимая амплитуда логического импульса инжекции	2.4—5 В
Информативность измерений	72 бит/период
Максимальная скорость выдачи информации через интерфейс RS-232	19.2 кбит/с
Количество «релейных» команд управления	4
Напряжение питания	23—30 В
Потребляемая мощность, не более	5 Вт
Габаритные размеры БЭ, не более	168×104×98 мм
Масса БЭ, не более	0.85 кг
Габаритные размеры ДИЭ	D85×60 мм
Масса ДИЭ, не более	0.15 кг

Примечание: Габаритные размеры и масса БЭ и ДИЭ указаны без учета кабелей и элементов крепления

храниться в нем в течение следующего периода, как код A2 амплитуды в предыдущем периоде. В момент, когда K1 вырабатывает импульс фиксации максимума в РГ2, происходит запись кода СЧ в РГ4. В результате после пика тока коллектора в РГ4 фиксируется код T2 времени максимума регистрируемого импульса в текущем периоде инжекции. Это является результатом измерения времени пролета частиц. Компаратор K2 сравнивает текущий код РГ1 с кодом старших 11-разрядов на выходе РГ3 (порог 0.5 амплитуды импульса в предыдущем периоде). Когда код РГ1 превышает вышеуказанный порог, K1 формирует логический импульс, по фронту и спаду которого детектор ДИ вырабатывает импульсы записи кода счетчика в РГ5 (фронт) и РГ6 (спад). В результате в РГ5 и РГ6 фиксируются коды T1 и T3, соответствующие временным интервалам, когда фронт и спад импульса регистрируемых частиц пересекает уровень 0.5 амплитуды импульса тока коллектора ДИЭ в предыдущем периоде инжекции. При поступлении очередного импульса инжекции информация с регистров РГ2...РГ6 переписывается в интерфейс, а затем указанные регистры обнуляются (кроме РГ3).

Интерфейс реализует последовательную асинхронную выдачу информации прибора «Регион» на телеметрическую систему (ТМС) согласно стандарту RS-232. Он преобразует параллельные коды A1, A2, T1, T2, T3, выдаваемые процессором в конце каждого периода инжекции, в телеметрический кадр из последовательности одиночных посылок. Каждая такая посылка состоит из: «старт-бита»,

5-8 бит данных, бита контроля и 1-2 «стоп-битов». Скорость передачи, количество посылок в кадре, число бит данных в посылке, наличие или отсутствие бита контроля и число «стоп-битов» определяются согласованным протоколом обмена. Если каждая посылка передает 4 бита исходных данных, то телеметрический кадр может состоять из 19 посылок, согласно табл. 2.

Интерфейс обеспечивает согласование скорости измерений и скорости выдачи данных на телеметрию. Если скорости передачи данных недостаточно для передачи информации об измерениях в каждом периоде инжекции, то происходит пропуск данных отдельных периодов. Работа интерфейса и процессора синхронизируется импульсом инжекции и тактовыми импульсами. Скорость обмена с телеметрией определяется внутренним отдельным генератором. Физически процессор и интерфейс реализуется на базе программируемой логической матрицы фирмы ALTERA, что существенно упрощает реализацию и отладку прибора в целом.

ВИП преобразует напряжение бортовой сети в ряд напряжений питания устройств БЭ и электродов ДИЭ. ВИП представляет собой изолирующий конвертор напряжения, обеспечивающий гальваническую развязку бортовой сети от корпуса БЭ.

Управление прибором «Регион» осуществляется с помощью релейных команд, подаваемых на ВИП. Это команды:

- ВКЛ. ПИТ — включение питания;
- ВЫКЛ. ПИТ — выключение питания;
- РИ — выбор режима регистрации ионов;

РЭ — выбор режима регистрации электронов.

Суммарные параметры прибора «Регион» приведены в табл. 3.

В зависимости от выбранного с помощью команд РИ или РЭ режима работы, осуществляется переключение напряжений на электродах ДИЭ и вырабатывается сигнал «Режим», управляющий переключением коэффициента передачи ПТН.

В заключение отметим технические решения, обеспечивающие высокие эксплуатационные характеристики прибора «Регион»:

Применение в ПТН усилителя с токовой обратной связью дает возможность существенно (до 10 м) удалить ДИЭ от БЭ. Это позволяет разместить БЭ в гермоотсеке модуля МКС и тем самым обеспечить более благоприятные условия эксплуатации для электроники прибора.

Применение высокоскоростного АЦП и ПЛМ позволяет реализовать полностью цифровую обработку сигнала ДИЭ. В результате повышается стабильность параметров прибора, уменьшается объем аппаратуры, упрощается настройка и отработка прибора.

Применение последовательного интерфейса выдачи данных в стандарте RS-232 дает возможность подключать прибор вместо ТМС к СОМ-порту персональных компьютеров, что весьма удобно в процессе отработки прибора.

1. Барабанов Н. А., Венедиков Ю. И., Гдалевич Г. Л. и др. «Блок детектора импульсов для космического эксперимента «КОЛЬЦО» на борту МКС» // Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тр. — Киев: АДЕФ-Украина, 2001.—С. 36—39.
2. Безруких В. В., Барабанов Н. А., Венедиков Ю. И. и др. Исследование малозергетичной плазмы в магнитосфере Земли на Хвостовом и Авроральном Зондах. Аппаратура и предварительные результаты // Космич. исслед.—1998.—36, вып. 1, январь-февраль 1998.
3. Гримальский В. В., Ивченко В. Н., Лизунов Г. В. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 21—30.
4. Черемных О. К., Голобородько В. Я., Резник С. Н. Численное моделирование распределения протонов в магнитосфере Земли на малых высотах // Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тр. — Киев: АДЕФ-Украина, 2001.—С. 146—150.

INJECTED PARTICLE TIME-OF-FLIGHT MEASUREMENTS DURING THE SPACE EXPERIMENT ABOARD THE ISS

N. A. Barabanov, L. M. Banduristiy, Yu. I. Venedikov,
S. G. Dovgal, Yu. A. Selivanov, O. K. Cheremnykh,
V. V. Bezrukikh, G. L. Gdalevich

We propose a procedure for time-of-flight measurements of injected plasma particles. The procedure is based on the use of the *Region* device during the active space plasma experiment *Ring* aboard the International Space Station in 2008.

© G. D. Aburjania, J. G. Lominadze, A. G. Khantadze, O. A. Kharshiladze

Tbilisi State University, Georgia
Georgian Space Agency, Georgia

GENERATION MECHANISM AND FEATURES OF PROPAGATION OF THE ULF PLANETARY-SCALE ELECTROMAGNETIC WAVY STRUCTURES IN THE IONOSPHERE

We give some results of a theoretical investigation of the dynamics of generation and propagation of planetary (with the wavelengths of 1000 km and more) ultra-low frequency (ULF) electromagnetic wave structures in the dissipative ionosphere. It is established that inhomogeneity (latitude variation) of the geomagnetic field and the Earth's rotation generates fast and slow planetary ULF electromagnetic waves. The waves propagate along the parallels to the east as well as to the west. In E-region the fast waves have phase velocities from 2 to 20 km/s and frequencies from 0.1 to 100 mHz; the slow waves propagate with local winds velocities and have frequencies 1—100 μ Hz. In F-region the fast ULF electromagnetic waves propagate with phase velocities from several ten to several hundred kilometres per second and their frequencies are in the range of 10 to 0.001 Hz. The slow mode is produced by the dynamo electric field, it represents the generalization of the ordinary Rossby type waves in the rotating ionosphere and is caused by the Hall effect in the E-layer. The fast disturbances are new modes, which are associated with oscillations of the ionospheric electrons frozen in the geomagnetic field and are connected with the large-scale internal vertical electric field generation in the ionosphere. The large-scale waves are weakly damped. The features and the parameters of the theoretically investigated electromagnetic wave structures agree with those of large-scale ULF midlatitude long-period oscillations and magnetoionospheric wave perturbations, observed experimentally in the ionosphere. It is established that because of relevance of the Coriolis and electromagnetic forces, generation of slow planetary electromagnetic waves at the fixed latitude in the ionosphere can give rise to the reverse of local wind structures and to the direction change of general ionospheric circulation. It is considered one more class of the waves, called as slow magnetohydrodynamic waves, on which inhomogeneity of the Coriolis and Ampere forces do not influence. These waves appear as an admixture of the slow Alfvén and whistler type perturbations. The waves generate the geomagnetic field from several ten to several hundred nanotesla and more. Nonlinear interaction of the waves under consideration with the local ionospheric zonal shear winds is studied. It is established that planetary ULF electromagnetic waves, at their interaction with the local shear winds, can self-localize in the form of nonlinear solitary vortices moving along the latitude circles westward as well as eastward with velocity different from phase velocity of corresponding linear waves. The vortices are weakly damped and long-lived. They cause geomagnetic pulsations stronger than the linear waves. The vortex structures transfer trapped particles of medium and also energy and heat. That is why such nonlinear vortex structures can be structural elements of strong macroturbulence of the ionosphere.

1. INTRODUCTION

Increasing interest in large-scale planetary ultra-low frequency (ULF) wave perturbations is caused by the fact that ionospheric phenomena like superrotation of the Earth's atmosphere [45], ionospheric precursors of natural processes [24, 25], ionospheric response to the anthropogenic activity [42, 46] fall into the range of these waves. Large-scale wave structures play an important role in the processes of general energy balance and circulation of the atmosphere and ocean. It was supposed that in natural conditions planetary waves are generated in the tropo-stratosphere and reach the ionospheric altitudes. However, theoretical investigation of the wave processes, as the basis for energy transfer from the lower atmosphere to the

upper one, shows that the system of the stable zonal winds screens (especially in summer) the upper atmosphere from the influence of large-scale planetary waves generated in the tropo-stratosphere [15, 18]. Conditions, most favourable to upward propagation of only very long planetary waves (with a wavenumber of 1 and 2), are created during equinoxes when the zonal winds change their direction [19]. Nevertheless, a great body of observational data has been stored up till now [7, 9, 13, 14, 37, 47—49, 56]. These data verify the permanent existence of ULF electromagnetic planetary-scale perturbations in E- and F-regions of the ionosphere. Among them, a special attention must be paid to large-scale zonal fast and slow wave perturbations propagating on a fixed latitude along the parallels around the Earth.

In midlatitude E-region of the ionosphere, the slow long-period planetary waves have phase velocity of order of local winds velocity 1–100 m/s, wavelength is equal to 1000 km and more, period varies from several days to tenth of a day, as it is obvious from observations carried out for many years [14, 37, 48, 56]; the fast waves propagate on the latitude circles along the Earth's surface with a velocity of order of 2 to 20 km/s, their periods vary from unit to several tenth of a minute and a few hours; their wavelength is of the order of 1000 km and more. They are revealed in the observations as midlatitude long-period oscillations (MLO) [7, 9, 47, 50]. Their phase velocities are different by one order in daily and nightly conditions in the ionosphere.

In F-region of the ionosphere in middle latitudes, the fast planetary electromagnetic wave perturbations are experimentally observed [9, 47, 49]. They propagate along the latitude circles with phase velocity from several ten to several hundred kilometres per second, with periods from a second to several minutes and with wavelengths of 1000 km and more. They are called as magnetoionospheric wave perturbations (MIWP) [47, 49]. Phase velocities of the fast MIWP have no important daily variations, but they depend on magnetospheric activity of the Sun.

Large phase velocities and their strong variations from day to night (in E-region) make it impossible to identify these perturbations with the ordinary magnetohydrodynamic (MHD) and gyroscopic waves. Amplitude of the geomagnetic pulsations in the waves mentioned above can vary from unit to several ten or several hundred nanotesla.

The ionospheric observations reveal one more class of the electromagnetic perturbations in E- and F-regions, called as the slow MHD waves [28, 50]. These waves (Alfvén and whistler type) are insensitive to spatial inhomogeneities of the Coriolis and Ampere forces and are propagated in the ionospheric medium more slowly than the ordinary MHD waves.

In natural conditions, these perturbations are revealed as background oscillations. The forced oscillations of this kind, as can be seen from observations, are generated by impulse action on the ionosphere from above, during magnetic storms [24], or from below, as a result of earthquakes, volcanic eruption or artificial explosions [42, 46]. In the last case the perturbations are revealed as the solitary vortex structures.

It follows from the above discussion that the source of the background wave perturbations must exist in E- and F-regions of the ionosphere. There is a need to reveal the factors guaranteeing generation of such perturbations. Therefore, for adequate description and

comprehension of the dynamic processes taking place in the ionospheric medium during formation and propagation of the waves, it is necessary to explore the nonlinear effects taking into account dispersion and dissipation of medium. Further, it is necessary to investigate the interaction of generated electromagnetic ULF waves with the medium, the possibility of generation of the exceeding winds and nonlinear solitary vortical structures on these modes.

This paper is devoted to an investigation of these phenomena.

2. MODEL OF THE MEDIUM AND BASIC EQUATIONS

Ionosphere represents partially ionized triple component plasma. To describe it, we take quasi-hydrodynamic equations which differ from hydrodynamic equations by the presence of «friction force» caused by collision of different particles [17, 28, 29]. Quasi-hydrodynamic equations describe the flows, electromagnetic currents and diffusive processes in the ionospheric plasma. However, the diffusive processes, compressibility and inhomogeneity of the atmosphere are of secondary importance for the large-scale ionospheric perturbations under consideration (wavelengths $\lambda \geq 1000$ km). Thus, we can substantially simplify these equations and obtain the following set of equations [17, 20, 28, 29, 31]:

$$\rho_n \frac{d\mathbf{V}_n}{dt} = \mathbf{F}_n - \rho_i \nu_{in} (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_i) - \rho_e \nu_{en} (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_e), \quad (1)$$

$$\rho_e \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = \mathbf{F}_e - \rho_e \nu_{en} (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_n) - \rho_e \nu_{ei} (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_i) - eNE - eNV_e \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

$$\rho_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = \mathbf{F}_i - \rho_i \nu_{in} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_n) - \rho_e \nu_{ei} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e) - eNE - eNV_i \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_n = 0, \nabla \cdot \mathbf{V}_e = 0, \nabla \cdot \mathbf{V}_i = 0, \quad (4)$$

where indices n , e , and i denote molecules (neutral particles), electrons, and ions; $d/dt = \partial/\partial t + (\mathbf{V}\nabla)$, \mathbf{V} is hydrodynamic velocity of corresponding sorts of particles; $\rho_n = N_n M$, $\rho_e = N m$, $\rho_i = NM$ are densities; m and M are masses of electrons and ions (molecules), respectively; N_n and N denote concentrations of the neutral particles and charged particles; ν_{ei} , ν_{en} , ν_{in} denote frequencies of collision of electrons with ions and molecules, of ions with molecules, respectively; E is the strength of the induced electric field; $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}$, \mathbf{B}_0 is the geomagnetic field, \mathbf{b} denotes the perturbation of the geomagnetic field; \mathbf{F}_n , \mathbf{F}_e , \mathbf{F}_i

denote the nonelectromagnetic forces, containing gradients of impulse flux density tensor in general case; $\nabla \equiv (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ is the nabla operator.

The equations (1)–(4), state and thermal equations and Maxwell's equations form the close system for each component. For simplification of these equations, we take into account the results of experimental observations of the dynamical processes.

In the ionosphere at heights of 80 to 500 km ($\eta = N/N_n \sim 10^{-9} - 10^{-4} \ll 1$) non-electromagnetic forces F_n , F_e , and F_i are proportional to the densities of medium components and, hence, $\eta \ll 1$, $|F_i| \leq |F_e| \ll |F_n|$. So, F_e and F_i cannot induce high currents. The inertia of electrons and ions can be neglected comparing with the inertia of neutral particles. Taking into account all these circumstances in Eqs (1)–(4), we derive the equation of ionospheric medium motion:

$$\rho_n \frac{d}{dt} V_n = F_n + j \times B, \quad (5)$$

where $j = eN(V_i - V_e)$ is the density of electric current.

Let us mention that at heights of E-region and higher the conductivity $\sigma_{||}$ along the geomagnetic force lines substantially exceeds the transversal σ_{\perp} and Hall's σ_H conductivities, i. e., $\sigma_{||} \gg \sigma_{\perp}, \sigma_H$. Thus, the component of the electric field $E_{||}$ along the geomagnetic force lines usually is less than the component E_{\perp} of the electric field across the geomagnetic field, i. e., $|E_{||}| \ll |E_{\perp}|$ [12]. Taking into account this circumstance and low-frequency of considered perturbations ($\omega \ll \omega_{e,i}$), Eqs (2) and (3) may be rewritten as

$$-\frac{\nu_{en}}{\omega_e} (V_e - V_n) - \frac{\nu_{ei}}{\omega_e} (V_e - V_i) + V_D \times n_0 = V_e \times n_0, \quad (6)$$

$$-\frac{\nu_{in}}{\omega_i} (V_i - V_n) - \frac{\nu_{ei}}{\omega_e} (V_i - V_e) + V_i \times n_0 = V_D \times n_0, \quad (7)$$

where $\omega_e = eB_0/m$ and $\omega_i = eB_0/M$ denote cyclotron frequencies of electrons and ions, respectively; e is elementary charge; $V_D = E \times B_0 / B_0^2$ is the electron drift velocity; $n_0 = B_0 / B_0$ is a unit vector along the strength of the geomagnetic field. In the ionosphere, $\omega_e \approx 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i \approx 150 - 300 \text{ s}^{-1}$, the collision frequency reaches its maximal value $\nu_{ei} \approx 10 \text{ kHz}$, $\nu_{in} \approx 10 \text{ kHz}$, $\nu_{en} \approx 100 \text{ kHz}$ at heights of 80 to 500 km in the lower layer of the ionosphere and quickly decreases in proportion to height. Thus, we can conclude that $\nu_{ei}/\omega_e \ll 1$, $\nu_{en}/\omega_e \ll 1$ in E- and F-layers of the ionosphere. This means that electron component of the ionospheric plasma is always magnetized in this region of the upper atmosphere. Taking into account these inequalities, Eqs

(6) and (7) can be reduced to the following form:

$$V_D \times n_0 = V_e \times n_0 \Rightarrow V_e = V_D \Rightarrow E = -V_e \times B_0, \quad (8)$$

$$V_i = V_n + j \times B_0 / (\rho \nu_i), \nu_i = N \nu_{in} / N_n. \quad (9)$$

Therefore, in E- and F-layers of the ionosphere, the electron component of the ionospheric plasma is always magnetized, moves with electron drift velocity ($V_e = V_D$) and the electrons are frozen into the geomagnetic field B_0 ($\partial b / \partial t = \nabla \times V_e \times B_0$). As for ion equation (9), for E-region of the ionosphere (altitudes are 80–150 km), we have $\omega_i / \nu_{in} \sim 0.01 \ll 1$, the second term in the right-hand side can be neglected in comparison with the first one and we have $V_i = V_n$. This means that in E-region of the ionosphere the neutral winds entrain ion components completely.

Multiplying Eq. (8) by B_0 , we derive the important equality $E \cdot B_0 = 0$, $\Rightarrow E \perp B_0$, i. e., internal electric field generated in E- and F-layers of the ionosphere is always perpendicular to the geomagnetic field B_0 .

Using Maxwell's equations, we get the close system of equations (5), (8), and (9):

$$\frac{\partial}{\partial t} B = -\nabla \times E, \quad j = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times B, \quad (10)$$

where μ_0 is the permeability of free space. Excluding E and j with the use of Eq. (10) and taking into account that for considered wavy processes $F_n / \rho = -\nabla P' / \rho + g + V \times 2\Omega_0$, dropping index n for velocity and density of the neutral particles, we obtain the system of nonlinear magneto-hydrodynamic equations for E- and F-layers of the ionosphere:

$$\frac{d}{dt} V = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + V \times 2\Omega_0 + \frac{1}{\mu_0 \rho} \nabla \times B \times B, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} B &= \nabla \times V \times B = \nabla \times V \times B - \frac{\alpha}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times B \times B + \\ &+ \frac{1}{\mu_0 \rho \nu_i} \nabla \times \nabla \times B \times B, \end{aligned} \quad (12)$$

where Hall's parameter α in general case is $\alpha = 1/(B_0 \sigma_H)$, $\sigma_H = e^2 N [\omega_e / (m(\omega_e^2 + \nu_e^2)) - \omega_i / (M(\omega_i^2 + \nu_{in}^2))]$ is Hall's conductivity; P is the perturbation of gas-kinematics pressure; $\nu_e = \nu_{ei} + \nu_{en}$; $\nu_i = \eta \nu_{in}$; g is the free fall acceleration; Ω_0 is angular velocity of the rotation of the Earth. For E-region of the ionosphere, we have $\omega_e \gg \nu_{en}$, $\omega_i \ll \nu_{in}$ and $\alpha = 1/(eN)$ (Hall's conductivity is disappeared higher than 150 km, $\sigma_H \rightarrow 0$).

It is obvious from equations (5) and (11) that the electromagnetic Ampere force F_A , acting on a unit mass of medium, is determined by the expression:

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{F}_A}{\rho} &= \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B}_0 = \frac{1}{\mu_0 \rho} \nabla \times \mathbf{b} \times \mathbf{B}_0 \approx \\ &\approx \mathbf{V} \times 2\Omega_i - \mathbf{V}_D \times 2\Omega_i = \mathbf{u} \times 2\Omega_i, \end{aligned} \quad (13)$$

where $2\Omega_i = \eta e \mathbf{B}_0 / M = \eta \omega_i$; $\mathbf{u} = \mathbf{V} - \mathbf{V}_D$. From Eq. (13) it follows that the Ampere electromagnetic force \mathbf{F}_A acting on an unit mass of the medium (or acceleration), $\mathbf{F}_A/\rho = \mathbf{u} \times 2\Omega_i$, has the same structure as the Coriolis acceleration $\mathbf{V} \times 2\Omega_0$. Therefore, the Ampere force must act on atmospheric-ionospheric medium similar to the Coriolis force. Similarity of the Ampere and Coriolis forces means that new modes of the large-scale electromagnetic oscillations must be generated due to inhomogeneity of the geomagnetic field \mathbf{B}_0 as well as Rossby-type usual planetary waves are generated due to inhomogeneity of angular velocity of the Earth's rotation Ω_0 . In this case, as it will be shown below, the first term of the electromagnetic force \mathbf{F}_A (13) caused by velocity of medium motion (dynamo field $\mathbf{E}_d = \mathbf{V} \times \mathbf{B}_0$) generates the slow Rossby-type electromagnetic waves; the second term of the electromagnetic force in (13) is appeared due to the vortex electric field $\mathbf{E}_v = \mathbf{V}_D \times \mathbf{B}_0$ and generates the fast electromagnetic waves.

Large-scale (planetary) waves are slightly damped due to turbulent and molecular viscosity and thermal conductivity, since the Reynolds number is large for such motions. Indeed, some estimations show that, for planetary-scale ($L \sim 1000-10000$ km) perturbations in E-region of the ionosphere, magnetic Reynolds number ($R_m = \omega L^2 / v_H \sim 1/\alpha$, where L and ω are characteristic linear scale and frequency of the perturbations, $v_H = 1/(\mu_0 \sigma_H)$) reaches a rather small value ($R_m \sim 1$) [20, 28, 31]. Therefore, it is necessary to preserve Hall's term ($\propto \alpha$) in the induction equation (12), but the last one can be neglected due to the condition $\sigma_H \gg \sigma_{\perp} \approx \sigma_H \omega_i / v_{in}$ (where σ_{\perp} is the transversal conductivity). Moreover, the large-scale ion motion velocity $\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_n$ in E-region of the ionosphere, i. e., neutrals completely entrain ions. Correspondingly, the effect of ion drag on the large-scale motion in the ionospheric E-region can be neglected (i. e., the last term in (12)). In F-region of the ionosphere, where the Hall effect is not important, the last term in Eq. (12) also can be neglected for planetary-scale perturbations in the first approximation as far as Reynolds number $R_{m\perp} = \omega L^2 / v_{\perp}$ ($v_{\perp} = 1/(\mu_0 \sigma_{\perp})$) is of the order of 100 [20, 28, 31]. Really, it can be concluded from observations that the planetary waves propagate over great distances in the ionosphere without substantial changes [9, 13, 14, 47, 48].

It is known that planetary Rossby waves are damped only due to the drag friction against the Earth's surface [23, 26]. Therefore, some authors suppose that it will be useful for qualitative understanding of the role of internal dissipation for large-scale flows to model the dissipative force in the form of the Reyleigh friction force, proportional to the velocity $\mathbf{F}_R = -\Lambda \mathbf{V}$, in the equation of motion [19, 23]. Here, Λ is the constant coefficient of surface friction of atmospheric layers, which reaches 10^{-5} s^{-1} at the ionospheric altitudes.

Hence, for E- and F-layers of the ionosphere, magnetohydrodynamic Eqs (11) and (12) may be written in the following form:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{V} \times 2\Omega_0 + \frac{1}{\mu_0 \rho} \nabla \times \mathbf{b} \times \mathbf{B} - \Lambda \mathbf{V}, \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{b} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{V} - (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{B}_0 - \frac{\alpha}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{b} \times \mathbf{B}, \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \nabla \cdot \mathbf{b} = 0, \nabla \times \mathbf{B}_0 = 0, \nabla \cdot \mathbf{B}_0 = 0. \quad (16)$$

Here $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}$, $\mathbf{B} = B_{0y} \mathbf{e}_y + B_{0z} \mathbf{e}_z$, $B_{0y} = -B_e \sin \theta'$, $B_{0z} = -2B_e \cos \theta'$, $B_e = 32 \mu\text{T}$ is the value of geomagnetic field induction on the equator; $2\Omega_0 = 2\Omega_{0y} \mathbf{e}_y + 2\Omega_{0z} \mathbf{e}_z$, $2\Omega_{0y} = 2\Omega_0 \sin \theta$, $2\Omega_{0z} = 2\Omega_0 \cos \theta$, $\Omega_0 = 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; $\theta = \pi/2 - \varphi'$, φ' is geomagnetic latitude; $\theta = \pi/2 - \varphi$, φ is geographical latitude; \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y , \mathbf{e}_z denote unit vectors along x , y , z axes, respectively.

The close system of nonlinear Eqs (14) and (15) contains six scalar equations and gives the possibility to calculate six unknown quantities: V_x , V_y , V_z , b_x , b_y , b_z . On determining the values \mathbf{V} and \mathbf{b} , pressure P will be determined from Eq. (11) in quadrature (as far as $\rho = \text{const}$); current density \mathbf{j} and electric field are calculated from Maxwell's equations (10); electron velocity is determined from the expression $\mathbf{V}_e = \mathbf{V}_D$ and ion velocity is determined from the formula (9). Thus, the initial-boundary problem of large-scale dynamics of triple component plasma for E- and F-layers of the ionosphere is solved completely.

The planetary wavy perturbations discussed have wavelength of order of the Earth's radius R . Therefore, it is naturally to consider the creation of large-scale perturbations in the Earth's atmosphere in spherical coordinate system [4]. However, some mathematical difficulties arising from theoretical investigation of equations obtained oblige us to consider the problem in «standard» coordinate system [21, 23, 26, 40]. In this system, x-axis is directed to the east towards the parallels, y-axis is directed to the north along meridian, z-axis is directed vertically up (local Cartesian coordinate system). Length elements dx ,

dy , dz are connected with the parameters of the spherical coordinate system λ , θ , r by the following approached formulas: $dx = R\sin\theta d\lambda$, $dy = -Rd\theta$, $dz = dr$. The velocities are: $V_x = V_\lambda$, $-V_y = V_\theta$, $V_z = V_r$. Here, λ is the longitude, R is the Earth's radius, r is the distance from the Earth's centre along its radius. This system is not equivalent to the ordinary Cartesian frame of reference as far as directions of the axes vary with the atmospheric particle motion from one point to the other one. However, for the large-scale processes, the terms related with spatial variations of coordinate axes, in equations of thermo-hydrodynamic atmosphere may be dropped in the first approximation [26, 40, 52]. Therefore, equation of motion in spherical coordinate system (taking into account relations between coordinates, mentioned above) has the same form as in the Cartesian frame of reference. This procedure simplifies the problem and investigation of dynamics of the large-scale processes in the atmosphere [21, 23, 26, 31, 40, 52] and therefore, it will be used also for magnetoactive ionospheric medium.

The method of «frozen-in» coefficients in dynamic equations will be also used below. This method is known as β -approximation (β -plane) [21, 23, 26, 40, 52] in spherical hydrodynamics and meteorology. In this approximation the parameters $\Omega_0(\theta)$, $\nabla\Omega_0(\theta)$, $\mathbf{B}_0(\theta')$, and $\nabla\mathbf{B}_0(\theta')$ are constant during integration of dynamical equations, in view of $\theta = \theta_0$, $\theta' = \theta'_0$. Medium motion is considered near θ_0 and θ'_0 , i. e., average values of adjunction of the geographical φ_0 and the geomagnetic φ'_0 latitudes, respectively. In this case, dynamical equations transform into equations with constant coefficients, which may be investigated by plane wave method. Application of β -approximation (or β -plane) leads to simple results, which gives the possibility to reveal more important features of motion on a rotating sphere, which differs from motion on a rotating plane. Further we assume that geographical latitude φ coincides with geomagnetic latitude φ' , i. e., $\theta = \theta'$, $\theta_0 = \theta'_0$.

According to the experimental data on ionospheric E- and F-regions [13, 21, 23, 26, 31, 40, 43], the ratio of the characteristic vertical velocity V_v to the horizontal one V_h : $V_v/V_h \leq L_v/L_h < 0.01$, where L_v and L_h are the characteristic vertical and horizontal size of disturbances, respectively. Thus, the large-scale motions in the ionosphere are mainly two-dimensional and quasi-horizontal. Thus, velocity vector has two nonzero components $\mathbf{V} = (V_x, V_y, 0)$. In these conditions, one can easily obtain two scalar equations for V_x and V_y from Eq. (14):

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} \right) V_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{B_{0z}}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial z} \right) - \frac{B_{0y}}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial y} \right) + 2\Omega_z V_y - \Lambda V_x + \frac{b_z}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} \right) - \frac{b_y}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial y} \right), \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} \right) V_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{B_{0z}}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial y} - \frac{\partial b_y}{\partial z} \right) - 2\Omega_{0z} V_x - \Lambda V_y + \frac{b_x}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial y} \right) - \frac{b_z}{\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial z} \right). \quad (18)$$

Analogously, from induction equation (15), one can derive three scalar equations for the components of perturbed magnetic field \mathbf{b} :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} \right) b_x &= \left(B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + B_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) V_x - \\ &- \frac{\alpha}{\mu_0} \left(B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + B_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial b_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial z} \right) + \\ &+ \left(b_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{b}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{b}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) V_x - \\ &- \frac{\alpha}{\mu_0} \left(b_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{b}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{b}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial z} \right) + \\ &\frac{\alpha}{\mu_0} \left[\left(\frac{\partial b_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial x} + \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial y} + \right. \\ &\left. + \left(\frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial z} \right] b_x, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} \right) b_y &= \left(B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + B_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) V_y - \\ &- \beta_{B2} V_y + \left(b_x \frac{\partial}{\partial x} + b_y \frac{\partial}{\partial y} + b_z \frac{\partial}{\partial z} \right) V_y - \\ &- \frac{\alpha}{\mu_0} \left[\left(B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + B_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} \right) - \beta_{B2} \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} \right) \right. \\ &\left. - \beta_{B1} \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\alpha}{\mu_0} \left[\left(\frac{\partial b_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{b}_y}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial x} + \right. \\ &\left. + \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial z} \right] b_y - \\ &\frac{\alpha}{\mu_0} \left(b_x \frac{\partial}{\partial x} + b_y \frac{\partial}{\partial y} + b_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} \right) b_z = -\beta_{B1} V_y - \\
 & - \frac{\alpha}{\mu_0} \left(B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + B_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} \right) + \\
 & + \frac{\alpha}{\mu_0} \left[\beta_{B1} \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial b_z}{\partial x} \right) - \beta_{B2} \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} \right) \right] - \\
 & - \frac{\alpha}{\mu_0} \left(b_x \frac{\partial}{\partial x} + b_y \frac{\partial}{\partial y} + b_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} \right) + \\
 & + \frac{\alpha}{\mu_0} \left[\left(\frac{\partial b_z}{\partial y} - \frac{\partial b_y}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial x} + \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} - \frac{\partial b_z}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial y} + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial z} \right] b_z. \quad (21)
 \end{aligned}$$

Here the parameters $\beta_{B1,2} = \partial B_{0z,y}/\partial y$ characterize the spatial (latitudinal) inhomogeneity of the geomagnetic field.

The system of equations (17)–(21), in corresponding initial and boundary conditions, describes nonlinear evolution of the spatial three-dimensional large-scale electromagnetic perturbations in noncompressible ionospheric E- and F-regions.

Further, only for simplicity, we shall neglect the dependence of the perturbed (wavy) quantities on the coordinate axis z . Moreover, for considered large-scale zonal wavy perturbations (as it will be shown below) dependence on axis z is not substantial and, consequently, it can be assumed that $\partial/\partial z \approx 0$. In general case $\partial/\partial z$ can be conserved, but in the dynamical equations (17)–(21) it can be integrated according to vertical conductive layer (according to axis z) in corresponding boundary conditions on the Earth's surface and in magnetosphere. Herewith, submitting the tensor components of conductivity, integrated with respect to height, the results will be identical to that for $\partial/\partial z \approx 0$, and only some constants will be changed by the order of unit.

Then, substituting z component of vector potential A of the magnetic field by formula $(\nabla \times \mathbf{b})_z = -\nabla_\perp^2 A$, and by the condition of noncompressibility of medium (4), we represent the velocity component in the form $V_x = -\partial \Psi / \partial y$, $V_y = \partial \Psi / \partial x$, where Ψ is the stream function. Then, operating on (17) by operator $\partial/\partial y$, on (18) by operator $\partial/\partial x$ and subtracting the second equation from the first one, we obtain:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\partial}{\partial t} + \Lambda \right) \nabla_\perp^2 \Psi + \beta \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \\
 & - \frac{1}{\mu_0 \rho} \left[\beta_{B1} \frac{\partial b_z}{\partial x} - \left(\beta_{B2} + B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} \right) \nabla_\perp^2 A \right] = \\
 & = J(\nabla_\perp^2 \Psi, \Psi) + \frac{1}{\mu_0 \rho} J(A, \nabla_\perp^2 A), \quad (22)
 \end{aligned}$$

where the parameter β characterizes the value of gradient of the angular velocity of the Earth's rotation $\beta = \partial 2\Omega_{0z}/\partial y$ or Rossby parameter.

Analogously, from equations (19)–(21) we get:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\partial}{\partial t} - C_{B1} \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla_\perp^2 A + B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} \nabla_\perp^2 \Phi - \\
 & - \beta_{B2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \Phi = J(\nabla_\perp^2 A, \Phi) + J(A, \nabla_\perp^2 \Phi) + \\
 & + 2J \left(\frac{\partial A}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + 2J \left(\frac{\partial A}{\partial y}, \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right), \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\partial}{\partial t} + C_{B1} \frac{\partial}{\partial x} \right) b_z + \beta_{B1} \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{\alpha}{\mu_0} \left(\beta_{B2} + B_{0y} \frac{\partial}{\partial y} \right) \nabla_\perp^2 A = \\
 & = J(b_z, \Psi) - \frac{\alpha}{\mu_0} J(A, \nabla_\perp^2 A). \quad (24)
 \end{aligned}$$

Here, we used the abbreviations: $C_{B1,2} = \alpha \beta_{B1,2} / \mu_0$, $\nabla_\perp^2 = \Delta_\perp = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 \Phi \equiv \Psi + \alpha b_z / \mu_0$ and $J(a, b) = \partial a / \partial x \cdot \partial b / \partial y - \partial a / \partial y \cdot \partial b / \partial x$.

From the set of Eqs (22)–(24) we can determine the temporal evolution of energy E :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{1}{2} \int [\rho (\nabla_\perp \Psi)^2 + \mu_0^{-1} ((\nabla_\perp A)^2 + b_z^2)] dx dy \right\} = \\
 = -\rho \Lambda \int (\nabla_\perp \Psi)^2 dx dy, \quad (25)
 \end{aligned}$$

and the potential enstrophy Q of wave perturbations:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{1}{2} \int [\rho (\Delta_\perp \Psi)^2 + \mu_0^{-1} ((\Delta_\perp A)^2 + (\nabla_\perp b_z)^2)] dx dy \right\} = \\
 = -\rho \Lambda \int (\Delta_\perp \Psi)^2 dx dy. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Energy E and entropy Q of the waves are conserved in the nondissipative case ($\Lambda = 0$).

The close system of nonlinear equations in partial derivations (22)–(26) describes the nonlinear dynamics of the planetary low-frequency electromagnetic wave perturbations in the ionospheric medium.

3. IONOSPHERIC PLANETARY ELECTROMAGNETIC LINEAR WAVY PERTURBATIONS IN THE FRAMEWORK OF β -PLANE

Let us begin an analysis of the system of dynamic equations (22)–(24) for the planetary-scale small-amplitude perturbations, for which these equations can be linearized.

As it was mentioned above, we consider a motion in neighbourhood of a fixed latitude $\varphi = \varphi_0$ ($\theta = \theta_0$). Then, all the coefficients in equations (22)–(24) became constant and the solutions can be sought in the form of the plane waves: $\exp\{i(k_x x + k_y y - \omega t)\}$,

where $\mathbf{k} = (k_x, k_y, 0)$ is wavy vector, ω is frequency of the perturbations. In these conditions, we get the following dispersion equation from Eqs (22)–(24):

$$\begin{aligned} \rho\alpha^2 k_\perp^2 & \left(\omega + \frac{k_x}{k_\perp^2} \beta + i\Lambda \right) [\omega^2 - (k_x^2 C_B^2 + \omega_H^2 - \\ & - k_y^2 C_{B2}^2 + 2ik_y^2 C_{B2}^2 k_y R \operatorname{tg}\theta_0)] - \mu_0 (\omega + k_x C_{B1}) (k_x^2 C_B^2 + \\ & + \omega_H^2 - k_y^2 C_{B2}^2 + 2ik_y^2 C_{B2}^2 k_y R \operatorname{tg}\theta_0) = 0, \end{aligned} \quad (27)$$

which has the third order with respect to frequency ω . Here $k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2 = k^2$, $C_B^2 = C_{B1}^2 + C_{B2}^2$ and ω_H is frequency of the helicons (whistlers), i. e.,

$$\omega_H = \frac{\alpha k}{\mu_0} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_0), \quad (28)$$

herewith, the parameters characterizing wavy perturbations in (27) are determined by the expression:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\partial 2\Omega_{0z}}{\partial y} = - \frac{\partial 2\Omega_{0z}}{R \partial \theta} = \frac{2\Omega_0}{R} \sin\theta_0 > 0, \\ C_{B1} &= \frac{\alpha}{\mu_0} \beta_{B1} = - \frac{2\alpha B_e}{\mu_0 R} \sin\theta_0 < 0, \\ C_{B2} &= \frac{\alpha}{\mu_0} \beta_{B2} = \frac{\alpha B_e}{\mu_0 R} \cos\theta_0 > 0; \end{aligned} \quad (29)$$

they do not depend on the spatial coordinates and are constants.

Cubic equation (27) has three classes of eigen solutions. Let us carry out an analysis of these solutions for different layers of the ionosphere.

3.1. Low-Frequency Long-Scale Electromagnetic Waves in E-Layer

3.1.a. Slow MHD Waves

Let us begin investigation of the roots of equation (27) for quasi-horizontal waves, characterized by periods from several ten minutes to two hours, with the wavelength from several hundred to several thousand kilometres and propagating in the ionosphere with a velocity of 1–2 km/s. Contrary to the classical MHD waves, these waves entrain into collective motion not only ionized but also neutral components of the ionospheric plasma. This process leads to decrease of the phase velocity of the waves by the factor $\eta = N/N_n$ (η is plasma ionization rate). That is why they are called as slow MHD waves [28, 50].

The slow MHD waves are insensitive to the Coriolis force as well as to the latitudinal inhomogeneity of the geomagnetic field. Therefore, in this limiting case dispersion relation (27) is reduced to

$$(\omega + i\Lambda)(\omega^2 - \omega_H^2) - \omega_{AM}^2 \omega = 0, \quad (30)$$

where ω_{AM}^2 is the square of the slow modified Alfvén frequency,

$$\omega_{AM} = \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_0)}{(\mu_0 \rho)^{1/2}} = k_y V_{AM} \sin\theta_0, \quad V_{AM} = \frac{B_e}{(\mu_0 \rho)^{1/2}}. \quad (31)$$

Representing perturbation frequency ω by the sum of real ω_0 (the eigen frequency) and imaginary γ (decrement) parts:

$$\omega = \omega_0 + i\gamma \quad (|\gamma| \ll \omega_0),$$

we obtain from (30):

$$\omega_0(\omega_0^2 - \omega_H^2 - \omega_{AM}^2) = 0,$$

$$\gamma(3\omega_0^2 - \omega_H^2 - \omega_{AM}^2) = -\Lambda(\omega_0^2 - \omega_H^2). \quad (32)$$

From the first equation (32) we have following three eigen frequencies for considered perturbations:

$$(\omega_0)_{1,2} = \pm(\omega_{AM}^2 + \omega_H^2)^{1/2}, \quad (\omega_0)_3 = 0. \quad (33)$$

Trivial solution $(\omega_0)_3$ (corresponding to the stationary state of medium $\partial/\partial t = 0$) also has a physical meaning (we shall consider this in the end of the next section).

Correspondingly, from the second equation (32), decrement can be determined:

$$\gamma = -\frac{\omega_{AM}^2}{2\omega_0^2} \Lambda. \quad (34)$$

In the long wavelength limit, when $\rho_i/\rho \gg k^2 c^2 / \omega_p^2$ (here c is the light speed, $\omega_p = (Ne^2/\varepsilon_0 M)^{1/2}$ is the ion plasma frequency, $\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$ is the permittivity of free space), the waves propagate along the meridians to the north as well as to the south as slow modified Alfvén waves:

$$\omega_0 = \pm \omega_{AM} = \pm \frac{k_y B_e}{(\mu_0 M N_n)^{1/2}} \sin\theta_0, \quad \gamma = -\frac{\Lambda}{2}, \quad (35)$$

and exhibiting a weak damping due to Rayleigh friction.

In the short wavelength limit, when $\rho_i/\rho \ll k^2 c^2 / \omega_p^2$, it follows from equations (32) and (33) that in E-layer of the ionosphere the helicons (whistlers) are propagated, i. e.,

$$\omega_0 = \pm \omega_H = \pm \frac{kk_y B_{0y}}{eN\mu_0}, \quad \gamma = -\frac{\rho \omega_p^2 \Lambda}{\rho k^2 c^2} \frac{1}{2}, \quad (36)$$

which are damped very weakly.

The existence of slow MHD waves with speeds of the order of 1–2 km/s in E-region [50] can not be explained in terms of ordinary atmospheric gravity waves (AGW), since their typical speeds at ionospheric altitudes do not exceed 700 m/s. Although these speeds are larger than those for AGW's in the ionosphere, they are still small for ordinary MHD type waves. The physical reason for such properties of the MHD perturbations in the ionosphere is that the plasma in E-region is not completely frozen into the magnetic field. Due to the fact that the ions are

completely dragged by the neutral particles ($\mathbf{V} = \mathbf{V}_i$), any perturbation arising in the ionized component immediately exchanges energy with the neutral component and thus it starts to propagate with the Alfvén speed, that is loaded by the heavy and dense neutral population, i. e., with the speed $B_{0y}/(\mu_0\rho)^{1/2}$. The value of that decelerated Alfvén speed is apparently much smaller than that for the plasma (ion) component, which is $B_{0y}/(\mu_0\rho_i)^{1/2}$. In the E-layer $\rho_i/\rho \approx N/N_n \approx 10^{-8}-10^{-9}$ and owing to this fact the loading effect is quite substantial.

As can be seen from (35), the phase velocity of the modified Alfvén wave is $V_{ph} = \omega_0/k_y = B_{0y}/(\mu_0\rho)^{1/2}$. For typical values of the neutral particle number density in the ionospheric E-layer, $N_n = 10^{18}-10^{19} \text{ m}^{-3}$, and $B_e \approx 30 \mu\text{T}$ at middle latitudes, we obtain $V_{ph} \approx \approx 1 \text{ km/s}$. The corresponding wavelength of the wave $\lambda = V_{ph}T$ (where T is the period of oscillations) has the characteristic value $\lambda \sim 1000 \text{ km}$. Thus, the slow MHD waves with a phase velocity of 1 to 2 km/s [28, 50] can be identified with the slow modified Alfvén waves, which smoothly are converted into helicons governed by the neutral component of E-layer. According to (35), they propagate northwards or southward along the meridian and are induced by the y-component of the geomagnetic field.

As it follows from (27), a weak dispersion of the modified Alfvén waves is caused by the spatial inhomogeneity of the Coriolis force, i. e., by the β -effect:

$$\omega_0 = \pm\omega_{AM} - \frac{k_x \beta}{k_\perp^2 \frac{\beta}{2}}. \quad (37)$$

A value of the geomagnetic pulsations generated by the waves under consideration can be estimated with the help of the equation (15) and we can obtain the formula $b_y \approx B_{0y}V/V_{ph}$, where V is characteristic amplitude of local wind velocity in E-region of the ionosphere and V_{ph} is phase velocity of the waves. For typical values of amplitude of the wind velocity V in E-region of the ionosphere, $V \sim 5 \text{ m/s}$, and $V_{ph} \sim 1 \text{ km/s}$, $B_0 \sim 30 \mu\text{T}$, we have $b_y \approx 150 \text{ nT}$.

3.1.b. Fast and Slow Planetary Electromagnetic Modes

For planetary-scale waves, we can not neglect the latitude variations of angular velocity of the Earth's rotation $\Omega_0(\theta)$ and the geomagnetic field $\mathbf{B}_0(\theta)$. In the present paper we use the term «planetary waves» in reference to the class of large-scale perturbations (with wavelengths of the order of the Earth's radius and more) having periods of order of a few seconds, a few hours and more, propagating along the latitude circles (along x-axis), i. e., they are zonal waves.

These zonal waves are horizontal-transversal, i. e., these particles oscillate along y-axis, but the waves propagate along x-axis. Exactly such waves are observed in above-mentioned experimental works [7, 9, 14, 37, 47–49, 56]. Naturally, for such waves the solution of initial dynamic equations (22)–(24) can be sought in the form $\exp\{i[k_x x - \omega t]\}$, at which $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_0) \equiv 0$ and according to (31) and (28) the slow MHD waves, helicon and Alfvén type waves will be filtered out. This is equal to the assumption $k_y R \operatorname{tg}\theta_0 \ll 1$ or $k_y \rightarrow 0$ in general dispersion equation (27). The last condition means that the oscillations do not propagate along y-axis, i. e., the waves do not propagate along y-axis and in this direction only the particles will oscillate.

Thus, for planetary zonal wave perturbations, the dispersion equation (27) reduces to the following form:

$$\omega [\omega(\omega - \omega_R) - \omega_B'^2] + i\Lambda(\omega^2 - k_x^2 C_B^2) + \omega_B^2 \omega'_R = 0, \quad (38)$$

where $\omega_R = -\beta/k_x$ is frequency of the Rossby waves, $\omega'_R = -\beta'/k_x$, $\beta' = \beta + eN\beta_{B1}/\rho$ is magnetic analog of the Rossby parameter, $\omega_B^2 = k_x^2 C_B^2$, $\omega_B^2 = k_y^2 C_B^2$, $\omega_B'^2 = (k_x^2 + k_0^2) C_B^2 = K^2 C_B^2$, $k_0^2 = \mu_0/(\alpha^2 \rho) = N \omega_p^2 / (N_n c^2)$.

Similar to the previous section, decomposing the frequency into its real and imaginary parts, we find from (38):

$$\begin{aligned} \omega_0 [\omega_0(\omega_0 - \omega_R) - \omega_B'^2] &= -\omega_B^2 \omega'_R, \\ \gamma = -\frac{\omega_0^2 - \omega_B^2}{3\omega_0^2 - 2\omega_0\omega_R - \omega_B'^2} \Lambda. \end{aligned} \quad (39)$$

In the high-frequency band when the conditions $\omega_0 \sim \omega_B \sim \omega_B' \gg \omega_R$, ω'_R are satisfied (or in the short wavelength limit when $Kk_x \gg \beta'/C_B$ and $k_x^2 \gg \beta/C_B$), from (39) one finds dispersions for the fast planetary electromagnetic modes:

$$\begin{aligned} \omega_0^f &= \pm\omega_B' = \pm(k_x^2 + k_0^2)^{1/2} C_B = \\ &= \pm \frac{B_e}{eN\mu_0} \frac{(1 + 3\sin^2\theta_0)^{1/2}}{R} (k_x^2 + k_0^2)^{1/2}, \\ \gamma^f &= -\frac{k_0^2}{k_x^2 + k_0^2} \frac{\Lambda}{2}. \end{aligned} \quad (40)$$

The fast mode (40) is an additional new mode of own oscillations of E-region of the ionosphere. Wave has the electromagnetic origin and can exist only in the presence of the latitudinal gradient of the equilibrium magnetic field, which is inevitably inherent in a dipole type magnetic configuration such as that of the Earth's ionosphere-magnetosphere. The linear fast waves (40) can propagate along the latitude circles to the west as well as to the east. Herewith, the waves propagate virtually without damping ($\gamma \ll \Lambda$, as well as for characteristic parameters in E-region we have:

$k_x \gg k_0 \sim 10^{-6} \text{ m}^{-1}$). Numerical calculations of the parameters of planetary waves (40) were carried out using models of the ionosphere and the neutral atmosphere [27] for low and high solar activity. Numerical calculations show that at $\theta_0 = 45^\circ$ in the interval of heights from 90 to 150 km phase velocity of waves $C_B = \omega'_B/k_x = (k_x^2 + k_0^2)^{1/2} B_e \sqrt{1 + 3\sin^2\theta_0} \times (eN\mu_0 k_x R)^{-1}$ vary from 4 to 1.4 km/s at night and from 400 to 800 m/s by day. Periods $T_B = \lambda_B/C_B$, where wavelength $\lambda_B = 2\pi/k_x$ at $\lambda_B = 2000$ km are in the range of 1.5 to 6 hours by day and from 4 to 12 minutes at night. Perturbation of the geomagnetic field of these waves $b_B = B_e \sqrt{1 + 3\sin^2\theta_0} \xi_e/R$ (where ξ_e is the electron displacement) is 8 and 80 nT at $\xi_e = 0.1$ km and $\xi_e = 1$ km. The influence of exosphere temperature on C_B and T_B is insignificant but is important for the magnetic field perturbations. The C_B and T_B values are substantially different in daytime and at night as far as electron concentration in E-region of the ionosphere varies by one order of magnitude during a day. From the equation for C_B and T_B one can see that, for measured values of C_B and T_B , height profiles of the electron concentrations in Hall's layer of ionosphere may be built exactly.

Parameters of C_B waves correlate well with parameters of MLO, which were observed experimentally [7, 9, 47, 49] at middle latitudes of E-region of the ionosphere and were extracted as middle-latitude long-period oscillations (MLO). But it is evident from Eq. (40) that there are not any restrictions for the existence of these perturbations at both high and low latitudes. They are revealed especially by world-wide network of ionospheric and magnetospheric observatories during earthquakes, magnetic storms and artificial explosions [8, 24, 25].

In the low-frequency band $\omega_0 \leq \omega_R \sim \omega'_R \ll \omega_B$, or in the long wavelength limit when $k_x^2 \ll \beta'/C_B$ and $KK_k \ll \beta'/C_B$, dispersion equation (39) has the solution in the form of frequency of the slow (Rossby type) modes:

$$\omega_0^s = -\frac{k_x}{k_x^2 + k_0^2} \beta', \quad \gamma^s = -\frac{k_x^2}{k_x^2 + k_0^2} \Lambda, \quad (41)$$

which is damping substantially ($\gamma^s \approx -\Lambda$ as well as $k_x \gg k_0$); but for more large-scale waves the damping can be weak.

Some calculations show that the phase velocities of these Rossby type waves (41) $C'_R = \omega_0^s/k_x = -\beta'\lambda^2/[4\pi^2(1 + k_0^2/k_x^2)]$ are in the range of -2 to +80 m/s in daytime, at heights of 90 to 150 km, $T_{\text{exos}} = 600$ K and $\lambda = 2\pi/k_x = 2000$ km. For $\lambda = 20000$ km phase velocities vary from -41 m/s to

+1.8 km/s in daytime and from -41 to -11 m/s at night. Velocities change from -3 m/s to +60 m/s in daytime and from -2 m/s to -1.3 m/s at night, $T_{\text{exos}} = 2600$ K and $\lambda = 2000$ km. In this case sign «→» points to the direction of phase velocity from the east to the west and sign «+» from the west to the east. Calculations show that $\beta' = (\Omega_0 - N\omega_i/N_h)2\sin\theta_0/R$ (here $\omega_i = eB_e/M$) tends to zero and $C'_R = 0$ in daytime at a height of 115 km. The parameter β' tends to zero also at a height of 150 km of nightly ionosphere. Hence, ordinary slow planetary Rossby waves, moving from the west to the east direction in daytime, prevail in the lower E-region at heights of 90 to 115 km; but higher than the critical height they are prevailed by the planetary waves having electromagnetic nature and moving from the west to the east directions which, at increase of the height, can not be called as slow waves as well as the velocities of these waves at a height of 150 km in the daytime can reach a value of 1 km/s and more at low solar activity ($T_{\text{exos}} = 600$ K). The Hall region is completely occupied by the slow Rossby waves at nightly ionosphere. Hence, magnetic control of planetary waves in the ionosphere depends on critical altitude where the condition $\beta' = 0$ is fulfilled. Experimentally, these altitudes may be revealed from detection of planetary waves jointly at both ionospheric and magnetospheric observatories. It can be seen from calculations that periods $T'_R = 2\pi/\omega_0^s$ are in the range from 14 days to 8 hours at heights from 90 to 150 km, $T_{\text{exos}} = 600$ K, $\lambda = 2000$ km. T'_R vary from 14 days to 2 hours at $T_{\text{exos}} = 2600$ K. Dependence of C'_R on the exosphere temperature is conditioned by the fact that β' parameter of the electromagnetic planetary waves includes the ionization level η , which leads us to the conclusion on increasing of phase velocities C'_R with height increasing. Perturbation of the geomagnetic field can be determined from the Maxwell equations $b_R \approx \approx |\mu_0 eNC'_R \xi|$ and it reaches a few tens of nanotesla (here ξ is the ion (neutral) displacement). The solution (41) practically coincides with the frequency of so-called magnetohydrodynamic gradient (MHG) modes revealed in the investigations [30, 53].

In the critical layers where $\beta' = 0$, the reverse of the local winds' directions takes place (i. e., the winds change their directions) and the superrotation of the Earth's upper atmosphere can arise [45]. Phase velocity of the wave (a wind) propagation, as it was mentioned above, is of order of $C'_R \approx -41...+100$ m/s and it covers the values of superrotation velocity of the upper atmosphere (of order of 55 m/s) observed from

satellites [45]. Thus, the slow planetary waves C'_R can be a reason of the superrotation of the Earth's upper atmosphere at different latitudes.

Parameters of C'_R -waves correlate well with observable parameters of planetary electromagnetic waves in E-region of the ionosphere at the middle latitudes during any season of a year [13, 14, 37, 48, 56].

3.2. Planetary-Scale Electromagnetic Waves in F-Layer

It was already mentioned in the section 2 that in F-region of the ionosphere the Hall effect, causing an additional electromagnetic gyroscopic action on medium, is lacked ($\alpha \approx 0$). Here, transversal conductivity prevails, which causes negligibly weak damping of the considered perturbations (see sec. 2). In this case, general dispersion equation (27) reduces to the following form:

$$\omega [\omega^2 - \omega(\omega_R - i\Lambda) - \omega_n^2 + \omega_{n2}^2 - \omega_{AM}^2 - 2i\omega_{n2}k_y R \operatorname{tg}\theta_0] = 0, \quad (42)$$

where

$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{1}{(\mu_0\rho)^{1/2}} \frac{k_x}{k_\perp} (\beta_{B1}^2 + \beta_{B2}^2)^{1/2} = \\ &= \frac{B_e}{(\mu_0\rho)^{1/2}} \frac{k_x}{k_\perp} \frac{(1 + 3\sin^2\theta_0)^{1/2}}{R}, \end{aligned} \quad (43)$$

$$\omega_{n2} = \frac{1}{(\mu_0\rho)^{1/2}} \frac{k_y}{k_\perp} \beta_{B2} = \frac{B_e}{(\mu_0\rho)^{1/2}} \frac{k_y}{k_\perp} \frac{\cos\theta_0}{R}.$$

3.2.a. Slow Alfvén Waves

Taking into account (as in the previous section) that inhomogeneities of the angular velocity of the Earth's rotation and the geomagnetic field practically do not affect on the dynamics of the slow MHD waves, so for eigen frequency ω_0 and for decrement of damping γ of the slow waves we get the following solution from the equation (42):

$$(\omega_0)_{1,2} = \pm\omega_{AM} = \pm\sqrt{\eta}\omega_A = \pm k_y V_{AM} \sin\theta_0, \quad (44)$$

$$\gamma = -\frac{\Lambda}{2},$$

$$(\omega_0)_3 = 0. \quad (45)$$

Here, non-dimensional parameter $\eta = N/N_n$ denotes the degree of plasma ionization and $\omega_A = (k \cdot B_0)/\sqrt{\mu_0 NM}$ is the ordinary Alfvén frequency. Dispersion equation (44) has two roots for positive and negative propagation directions. Group velocity of these perturbations is directed along the force lines of the geomagnetic field B_0 . The electromagnetic perturbations with the frequency (41) are modified, or slow Alfvén waves. Modified Alfvén waves are slow waves as far as parameter η varies in the range of 10^{-7} to

10^{-3} for F-region of the ionosphere at heights from 200 to 500 km. They can propagate in F-region of the ionosphere along the meridian to the north as well as to the south and are weakly damped by Raileigh friction. For typical value of particle density in F-region of the ionosphere, $\rho \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ kg/m}^3$, it follows from (44) that phase velocity of the slow Alfvén waves reaches the value $V_{ph} = \omega_0/k_y \approx 4 \text{ km/s}$. The wavelength is of the order of $\lambda = V_{ph}T \sim 1000$ —10000 km, frequency occupies the range from 0.01 to 0.001 Hz. The waves generate geomagnetic pulsations of the order of $b \approx B_0V/V_{ph} \sim 1 \mu\text{T}$. Consequently, in F-region of the ionosphere the observed large-scale electromagnetic perturbations, propagating along the meridians to the north or to the south with a velocity more than 2.5 km/s [22, 50], can be identified with the slow Alfvén waves. The features of the solution (45) will be discussed in the end of the section.

3.2.b. Fast Planetary Electromagnetic Modes

Similarly to the item 3.1.b., from Eq. (42) we obtain the following dispersion equation describing frequency characteristics of the zonal perturbations propagated along the latitude circles (along x-axis directing towards parallel) for large-scale processes in F-region of the ionosphere, when latitudinal inhomogeneity of geomagnetic field B_0 is not negligible:

$$\omega_0 [\omega_0^2 - \omega_0\omega_R - \omega_n^2] = 0, \quad \gamma = -\frac{\omega_0}{2\omega_0 - \omega_R} \Lambda. \quad (46)$$

Taking into account that the penetration of the ordinary Rossby waves to the heights of F-region of the ionosphere is difficult [15, 18] and with $\omega_R \ll \omega_n$, from (46) we obtain following three solutions:

$$\begin{aligned} (\omega_0)_{1,2} &= \pm\omega_n = \pm\sqrt{\eta} \frac{B_e}{\sqrt{\mu_0 MN}} \frac{(1 + 3\sin^2\theta_0)^{1/2}}{R}, \\ \gamma_n &= -\frac{\Lambda}{2}, \\ (\omega_0)_3 &= 0. \end{aligned} \quad (47)$$

The solution (47) characterizes only the oscillating regime of the zonal perturbations and represents standing waves around the parallels as it takes place for the Langmuir waves in completely ionized plasma [33]. As the height increases, the neutral concentration in F-region of the ionosphere and higher varies in a wide range (by several orders); the eigenfrequency of the zonal oscillations ω_n (47) caused by permanently acting factor, which is global for the ionosphere (latitudinal inhomogeneity of the geomagnetic field), varies in a wide range of frequencies as well. At the magnetic equator ($\theta = 90^\circ$), the frequency ω_n will be twice as large as that at the magnetic pole ($\theta = 0$).

The large-scale electromagnetic perturbation with frequency (47) is a new eigen mode for F-region of the ionosphere.

In the presence of the planetary Rossby waves in F-region of the ionosphere (to which a favourable condition takes place during equinoxes) [15, 18, 19], it follows from equation (46) that the considered perturbations already propagate along the latitude circles, i. e., they became waves and acquire the dispersion:

$$V_{ph}^2 = \frac{C_n^2}{1 - \omega_R/\omega},$$

where $C_n = \omega_n/k_x$, $V_{ph} = \omega/k_x$ is the phase velocity of the wave propagation. These waves also can propagate in F-region of the ionosphere and also cause an interaction with a zonal wind V_0 . Indeed, taking into account the zonal winds $\omega_0 = k_x V_0 + \omega_n$, we obtain for phase velocity: $V_{ph} = \omega/k_x = V_0 + C_n$. The group velocity of the wave $C_{gr} = \partial\omega/\partial k$ will coincide with zonal wind velocity $C_{gr} = V_0$ in F-region of the ionosphere. Thus, measuring the group velocity of these electromagnetic perturbations on the basis of the data derived at the ionospheric and magnetospheric observatories gives the possibility to determine zonal wind velocity in F-region of the ionosphere, for measurements of which an effective experimental method has yet to be developed.

For F-region of the ionosphere, these waves were detected experimentally in [6, 9, 47, 49] as magneto-ionospheric wave perturbations (MIWP).

It can be seen from the calculations that the phase velocity of these waves $C_n = \omega_n/k_x$ is in the range of 20 to 1400 km/s at heights of 200 to 500 km (wavelength is $\lambda_n = 2000$ km, $\theta = 45^\circ$, exosphere temperature is $T_{exos} = 600$ K) and 10–50 km/s at $T_{exos} = 2600$ K. Period of these waves $T_n = 2\pi/\omega_n$ does not depend on the wavelength and is in the range of 3–105 s at $T_{exos} = 600$ K and of 40–210 s at $T_{exos} = 2600$ K. Magnetic pulsations induced by these waves are of the same order of magnitude as C_B -waves, $b_n = b_B$. The strong dependence of the parameters C_n and T_n on the exosphere temperature can be explained by «swelling» of atmosphere and lifting of heavy particles from lower layers of ionosphere. General increasing of phase velocities C_n with height and latitude θ increasing is a result of equation (47) for ω_n . The waves are weakly damped with the decrement $|\gamma| = 0.5\Lambda \approx 10^{-6}$ s⁻¹. The periods, phase velocities, and amplitudes of geomagnetic pulsations for C_n -waves in the middle-latitude ionosphere are in good agreement with observational data on both middle-latitude and large-scale electromagnetic perturbations generated in

F-region of the ionosphere during powerful earthquakes and magnetic storms [24, 25]. This is a new fast mode of own oscillations of F-region of the ionosphere.

3.3. Stationary State of the Considered Medium

Let us mention that in the general case from the initial system of equations (14) and (15) it follows the dispersion equation of the sixth order according to the frequency ω . From them in E-region of the ionosphere there exist four types of eigen oscillations: the slow Alfvén waves (35) and the atmospheric whistles (the helicons) (36); the planetary fast electromagnetic waves (40) and the slow Rossby type electromagnetic waves (41). In F-region there also exist four types of the eigen oscillations: two modified slow Alfvén waves (propagating along the meridians to the north and to the south) (44) and two fast large-scale electromagnetic waves (47). Two frequencies (out of six frequencies mentioned above) are equal to zero ($\partial/\partial t = 0$, $\omega_{5,6} = 0$) and they also have a physical meaning corresponding to the hydrodynamic and electromagnetic equilibrium in the main state of the ionosphere.

Indeed, in order to determine equilibrium (stationary) state in initial system of equations (14) and (15), it is necessary to assume $\partial/\partial t = 0$. Since in equilibrium state the geomagnetic field $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$ (i. e., $\mathbf{b} = 0$) has nonvorticity (dipole) character $\nabla \times \mathbf{B}_0 = 0$, the electromagnetic Ampere force becomes mainly equal to zero $\mathbf{F}_A = \nabla \times \mathbf{B}_0 \times \mathbf{B}_0 / (4\pi\rho) = 0$. Then, from the equations (14) and (15) (at $\partial/\partial t = 0$) we obtain:

$$\mathbf{V}_0 \times 2\Omega_0 = -\frac{1}{\rho} \nabla P_0 + \mathbf{g} - \Lambda \mathbf{V}_0, \quad (48)$$

$$\nabla \times (\mathbf{V}_0 \times \mathbf{B}_0) = -\nabla \times \mathbf{E} = 0. \quad (49)$$

Writing equation (48) with respect to components, we get the condition of quasistaticity $\partial P_0/\partial z = -\rho g$ and gradientility of the wind

$$V_{0x} = -(\Lambda \partial P_0 / \partial x + \Omega_0 \partial P_0 / \partial y) / [\rho(\Lambda^2 + 4\Omega_0^2)],$$

$$V_{0y} = -(\Lambda \partial P_0 / \partial y - \Omega_0 \partial P_0 / \partial x) / [\rho(\Lambda^2 + 4\Omega_0^2)],$$

which in those regions of the ionosphere where the Raileigh friction can be neglected ($\Lambda = 0$) transits into condition of quasigeostrophicity $\mathbf{V}_0 = \mathbf{V}_g = [\mathbf{e}_z \nabla P_0] / (2\omega_{0z}\rho)$ of the atmosphere. Here, P_0 is equilibrium pressure, \mathbf{g} is gravity acceleration, \mathbf{V}_g is geostrophic wind velocity. Correspondingly, from equation (49) it follows that in equilibrium state the electric field of polarization \mathbf{E} has the electrostatic character ($\nabla \times \mathbf{E} = 0$) and it will be generated in the upper atmosphere by the wind \mathbf{V}_0 . Indeed, integrating

(49), we get $\mathbf{E} = -\nabla\varphi = -\mathbf{V}_0 \times \mathbf{B}_0$. Thus, zero frequencies also have some physical meanings and represent the known stationary solutions of the equations of magnetohydrodynamics of the ionosphere and correspond to quasistatic, quasigeostrophic, and electromagnetic equilibrium.

4. NONLINEAR INTERACTION OF PLANETARY ELECTROMAGNETIC WAVES WITH SHEAR ZONAL WINDS IN THE IONOSPHERE

It is shown in the previous section that large-scale modified slow MHD, planetary fast and slow electromagnetic linear waves propagate in E- and F-regions (direction of propagation depends on the frequency). Now we consider the influence of the nonlinear effects on the dynamics of linear eigenwaves of the ionospheric medium, which are discussed in the previous sections. Experimental data and observations show [16, 39, 41] that the nonlinear solitary vortex structures may exist in the different layers of the Earth's atmosphere. These structures carry away the trapped circulating particles. The ratio of the particle rotational velocity U_c and the vortex displacement velocity U satisfies the following condition:

$$U_c/U \geq 1.$$

Let us define T and L as the characteristic temporal and spatial scales. According to the formula $V \propto \partial\Psi/\partial y$, we have the expressions: $U_c \propto \Psi/L$, $U \propto L/T$. On introducing (22), we get: $J(\Psi, \Delta\Psi)/\partial\Delta\Psi/\partial t \propto \Psi T/L^2 \propto U_c/U$. Hence, nonlinearity is very important for the wave processes satisfying the condition $U_c \geq U$. Thus, these estimations show that the nonlinear effects can play a substantial role in the case of the large-scale low-frequency electromagnetic waves studied in the linear stage in the previous sections. The inequality $U_c \geq U$ coincides with antitwisting condition, only at which the corresponding system of the nonlinear dynamic equations can have a solitary vortex solution [55].

From the general theory of nonlinear waves it is known [38, 54] that if in the system the nonlinear effects are sufficient, superposition principle can not be used and solution can not be given in a form of a plane wave. Nonlinearity destroys the wave profile and a waveform differs from sinusoid. If in the nonlinear system dispersion is lacked (or β -effect, inhomogeneity of the equilibrium parameters of the medium), then all the small-amplitude waves with the different wave numbers κ are propagated with equal velocities and can interact with each other for a long

time. Thus, a small nonlinearity also leads to the accumulation of distortions. Such nonlinearity distortion, as a rule, leads to an increase of the wave front curvature and its upset or to a shock-wave formation. In the presence even a small dispersion (or β -effect, and so on) the phase velocities of the waves with different k are not equal, the wave packet has a tendency to a spreading and, because of this, at not so large wave amplitude the dispersion can compete with nonlinearity. Consequently, the waves can be decayed into different nonlinear wave structures before its upset and the shock-wave will not be formed. In the real atmosphere, the shock-wave actually will not be formed itself (spontaneously, without external influence). First of all, this shows that in the atmospheric-ionospheric medium the dispersion effect (or equivalent to it β -effect, inhomogeneity of the equilibrium parameters of the medium, and so on) is strongly expressed and successfully competes with the nonlinear distortion. If nonlinear increase of the wave front curvature is compensated by their dispersion spreading, there can be existed the stationary waves, i. e., the solitary waves propagating without changing their shapes.

Results of ground-based and satellite observations bring out clearly that at different layers of the ionosphere there permanently exist zonal winds (flows) having inhomogeneous velocity along the meridians [20, 23, 28, 31]. Because of this, we take further into account interaction of the considered waves with an inhomogeneous (shear) wind (a flow). It will be shown that when there is a velocity inhomogeneity in the zonal flow, the wave perturbations can acquire an additional dispersion at interaction with it and the nonlinear effects will be appeared in their dynamics. Thus, the ionospheric medium creates a condition which is favourable to formation of the nonlinear stationary solitary wave structures.

Thus, we will seek the solution of the full system of nonlinear dynamic equations (22)–(24) (in nondissipative stage, $\Lambda = 0$) in the form $\Psi = \Psi(\eta, y)$, $A = A(\eta, y)$, $b_z = b_z(\eta, y)$, where $\eta = x - Ut$, i. e., in the form of stationary solitary waves propagating along x-axis (along the parallels) with velocity $U = \text{const}$ without changing its shape. To avoid confusion, let us notice that by a nonlinear solitary wave is here meant a perturbation localized even if for one coordinate. We will consider also that waves are propagated on background of the mean horizontal wind with zonal shear of velocity $\bar{V}(y)$. Stream function Ψ in this case is equal to

$$\Psi = \psi - \int_{-\infty}^y \bar{V}(y) dy, \quad (50)$$

where ψ is the deviation of stream function from average value.

To simplify further investigation, we will seek a class of solutions for which $\Psi = -\alpha b_z/\mu_0$ and $\nabla_\perp^2 A = \partial b_y/\partial x - \partial b_x/\partial y = f(y)$, where f is an arbitrary function of its argument; further it will be assumed decreasing fastly at infinity. Then, substituting the expression (50) into system (22)–(24), on simple transformations we obtain:

$$J \left(\psi - \int_{-\infty}^y \bar{V}(y) dy + Uy, \nabla_\perp^2 \psi - \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \right. \\ \left. + \left(\beta' + \frac{\mu_0}{\alpha^2 \rho} U \right) y \right) = 0, \quad (51)$$

where $J(a, b) = \partial a/\partial x \cdot \partial b/\partial y - \partial a/\partial y \cdot \partial b/\partial x$ is the Jacobian.

Let us mention that the linear electromagnetic waves investigated in the section 3 are basically zonal, i. e., for them the direction along a parallel (on the axis x) is primary. Therefore, for perturbations of such polarization, it is more adequate to consider nonlinear wave structures which are longer on the axis x , i. e., the scale on the axis x is much greater than the scale on the axis y .

Let us consider in more detail the construction of long-wave (on the axis x), solitary spatially two-dimensional solution of equation (51). We will show that in this case equation (51) can be reduced to stationary equation of Kortevég — de Vries (KDV) for the zonal component of motion [11, 36, 44]. In this section the results of these works will be generalized on the basis of the general equation of the planetary electromagnetic waves — vortices (51) describing propagation of stationary nonlinear wave structures.

Let us pass to non-dimensional variations in the equation (51): $\psi = \psi' V L$, $\bar{V} = \bar{V}' \omega_0 L$, $U = U' \omega_0 L$, $\beta' = (\beta')' \omega_0 L$, $\eta = \eta' L/\delta = \eta' L_x$, $y = y' L$, where L and L_x are spatial scales of a vortex according meridian and zonal directions, V is characteristic velocity of medium particles, and ω_0 is eigenfrequency of one of the considered linear electromagnetic waves, we get:

$$\varepsilon \delta^2 J \left(\psi', \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \eta'^2} \right) + \varepsilon J \left(\psi', \frac{\partial^2 \psi'}{\partial y'^2} \right) + \\ + \left(\alpha_0 U' + (\beta')' - \frac{\partial^2 \bar{V}'}{\partial y'^2} \right) \frac{\partial \psi'}{\partial \eta'} + \\ + \delta^2 (\bar{V}' - U') \frac{\partial^3 \psi'}{\partial \eta'^3} + (\bar{V}' - U') \frac{\partial^3 \psi'}{\partial y'^2 \partial \eta'} = 0, \quad (52)$$

where $\varepsilon = V/(\omega_0 L) \ll 1$, $\delta = L/L_x < 1$, $\alpha_0 = \mu_0 L^2/\alpha^2 \rho = N \omega_p^2 L^2 / N_n c^2$ (further we will not use the primes on the non-dimensional values). We are interested in the waves, for which nonlinearity and

dispersion are of the same order. Assuming that $\delta^2 = \varepsilon$ in (52), we get:

$$(\bar{V} - U) \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^2 \partial \eta} + \left(\alpha_0 U + \beta' - \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \psi}{\partial \eta} + \\ + \varepsilon \left[(\bar{V} - U) \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta^3} + J \left(\psi, \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \right] + \varepsilon^2 J \left(\psi, \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} \right) = 0. \quad (53)$$

We will seek the solution in the form:

$$\psi = \psi_0 + \varepsilon \psi_1 + \varepsilon^2 \psi_2 + \dots, \\ U = U_0 + \varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \dots \quad (54)$$

Substituting (54) into (53) and equalizing to zero the components of the same order of smallness, we get a linear equation in zero approximation:

$$\left(\alpha_0 U_0 + \beta' - \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \psi_0}{\partial \eta} + (\bar{V} - U_0) \frac{\partial^3 \psi_0}{\partial y^2 \partial \eta} = 0, \quad (55)$$

with boundary conditions $\psi_0(\eta, 0) = \psi_0(\eta, 1) = 0$ corresponding to the flows bounded along the meridians (let us mention that in the case of infinite region this condition leads to equality of the stream function to zero at infinity: $\psi \rightarrow 0$ at $y \rightarrow \pm\infty$). Separating the variations $\psi_0 = F(\eta) \cdot \Phi(y)$, we obtain standard problem of Sturm — Liouville:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + G(y) \Phi = 0, \quad \Phi(y_1) = \Phi(y_2) = 0, \quad (56)$$

$$G(y) = \frac{1}{V - U_0} \left(\alpha_0 U_0 + \beta' - \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right),$$

where y_1 and y_2 are coordinates of the zonal flow edges.

For definition, let us consider the case where a zonal wind has a weak shear and its velocity harmonically varies in the meridian direction:

$$\bar{V} = V_0 [1 + a_0 \sin(\kappa_0 y)], \quad a_0 \ll 1. \quad (57)$$

Then, the general solution (56) takes the form:

$$\Phi = \Phi_0 \sin(n\pi y), \quad U_0 = \frac{m^2(V_0 - \beta'/m^2)}{m^2 + \alpha_0}, \quad (58)$$

where Φ_0 is an arbitrary constant amplitude, $m = n\pi$.

The next approximation includes the effects of dispersion and nonlinearity:

$$\frac{\partial^3 \psi_1}{\partial y^2 \partial \eta} + G(y) \frac{\partial \psi_1}{\partial \eta} = - \frac{\partial^3 \psi_0}{\partial \eta^3} - \frac{\alpha_0 U_1}{\bar{V} - U_0} \frac{\partial \psi_0}{\partial \eta} + \\ + \frac{1}{\bar{V} - U_0} \frac{\partial \psi_0}{\partial y} \frac{\partial^3 \psi_0}{\partial y^2 \partial \eta} - \frac{1}{\bar{V} - U_0} \frac{\partial \psi_0}{\partial \eta} \frac{\partial^3 \psi_0}{\partial y^3} + \\ + \frac{U_1}{\bar{V} - U_0} \frac{\partial^3 \psi_0}{\partial y^2 \partial \eta}. \quad (59)$$

Here ψ_1 satisfies the same boundary conditions as ψ_0 . Assuming $\psi_0 = F(\eta) \cdot \Phi(y)$, multiplying (59) by Φ and integrating transverse to the flows, we get:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \eta} \int_{y_1}^{y_2} \psi_1 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + G(y) \Phi \right) dy = \\ & = a_1 U_1 \frac{\partial F}{\partial \eta} + a_2 F \frac{\partial F}{\partial \eta} + a_3 \frac{\partial^3 F}{\partial \eta^3}. \end{aligned} \quad (60)$$

It is clear that, according to (56), the left-hand side of equation (60) is equal to zero. Consequently, the function $F(\eta)$ must satisfy the stationary KDV equation:

$$\frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{a_2}{a_1 U_1} F \frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{a_3}{a_1 U_1} \frac{\partial^3 F}{\partial \eta^3} = 0, \quad (61)$$

where

$$\begin{aligned} a_1 &= - \int_{y_1}^{y_2} (\alpha_0 + G(y)) \frac{\Phi^2}{V - U_0} dy, \\ a_2 &= \int_{y_1}^{y_2} \frac{\Phi^3}{V - U_0} \frac{\partial G}{\partial y} dy, \quad a_3 = - \int_{y_1}^{y_2} \Phi^2 dy. \end{aligned}$$

In accordance with integration constants, the solution of KDV equation represents either the solitary wave (the vortex) or the periodic (cnoidal) wave. We are interested in solutions of the soliton form:

$$F(\eta) = \text{sgn}(a_2 a_3) A \text{sech}^2(\kappa \eta), \quad (62)$$

where A is an arbitrary constant amplitude of soliton, $\kappa^{-1} = d$ is characteristic spatial width of soliton.

Substituting (62) into (61), we get the following expressions for U_1 and κ :

$$\begin{aligned} U_1 &= - \text{sgn}(a_2 a_3) \frac{a_2}{3 a_1} A, \\ \kappa^2 &= \frac{1}{12} \left| \frac{a_2}{a_3} \right| A. \end{aligned} \quad (63)$$

Let us mention that expression (58) fixes the velocity U_0 for every eigen function Φ and that amplitude A is a unique arbitrary constant. For the existence of a solution of KDV equation, it is necessary that the value $V - U_0$ should not become zero in the interval $y_1 < y < y_2$. This condition and the expression $\varepsilon = \delta^2$ are unique restrictions on amplitude of the nonlinear vortex structures.

Correspondingly, the stream function can be determined by integration of expression (50) taking into account (57) and (58) at smallness of the parameter of velocity shear ($a_0 \ll 1$):

$$\psi = - V_0 y + \psi_0^0 \sin(n\pi y) \text{sech}^2(\kappa \eta). \quad (64)$$

Here, $\psi_0^0 = \Phi_0 A \text{sgn}(a_2 a_3)$ and in accordance with (63) we determine the characteristic scale of the nonlinear vortex:

$$\begin{aligned} \kappa^{-1} = d &= \\ &= \left| \frac{\psi_0^0 V_0 a_0 \kappa_0^3 n \pi (7n^2 \pi^2 + \kappa_0^2) [1 - (-1)^n \cos \kappa_0]}{8(V_0 - U_0)^2 (n^2 \pi^2 - \kappa_0^2) (9n^2 \pi^2 - \kappa_0^2)} \right|^{-1/2}. \end{aligned} \quad (65)$$

It is obvious that the characteristic size of the vortex is inversely proportional to the amplitude of the structure (ψ_0^0), as it must be for the nonlinear soliton structures [54], it depends on the amplitude of the wind velocity V_0 , and on the velocity U_0 of the vortex motion as well.

Analogously, for full velocity of movement of the nonlinear vortical structures we get:

$$\begin{aligned} U &= \frac{m^2}{m^2 + \alpha_0} \left(V_0 - \frac{\beta'}{m^2} \right) + \\ &+ \frac{\psi_0^0 V_0}{2} \left\{ a_0 \kappa_0^3 n \pi (7n^2 \pi^2 + \kappa_0^2) (4n^2 \pi^2 - \kappa_0^2) \times \right. \\ &\times [1 - (-1)^n \cos \kappa_0] / [(n^2 \pi^2 - \kappa_0^2) (9n^2 \pi^2 - \kappa_0^2) \times \\ &\times [(\alpha_0 U_0 + \beta') (4n^2 \pi^2 - \kappa_0^2) + \\ &\left. + 4a_0 V_0 \kappa_0 n^2 \pi^2 (1 - \cos \kappa_0)] \right\}. \end{aligned} \quad (66)$$

It is obvious that velocity of movement of the nonlinear vortical structures along the parallel depends on the wind velocity V_0 , inhomogeneities of the geomagnetic field and angular velocity of the Earth's rotation (β'), and also on amplitude of the structures (A , ψ_0^0), as it is peculiar for nonlinear solitary formation [38, 54]. The expression (66) shows that velocity of movement of the vortex can become zero, i. e., standing structures can be formed. Moving vortices can exist on the background of both western ($V_0 > 0$) and eastern ($V_0 < 0$) winds.

For these wave perturbations, velocity vortex is distinct from zero, $\nabla \times \mathbf{V} \approx \nabla_\perp^2 \Psi \mathbf{e}_z \neq 0$. Consequently, they are vortical formations carrying trapped-rotating particles.

According to the formula (64), the current lines, the level lines and spatial relief of the vortex structures in the moving coordinate system (η, y) can be built. For definiteness, as linear scale in the zonal direction, the Earth's radius is chosen, $L_x \sim 1000$ km; $a_0 \sim \varepsilon \sim \delta^2 \sim 0.01$; accordingly, the scale of length to the meridian direction is $L \sim 0.1 L_x$. The time scale is determined by the characteristic period of the wave perturbations. For characteristic value of the zonal wind amplitude, the value $V_0 = 100$ km/s is chosen. Fig. 1 shows the stream lines for the characteristic values of the parameters of medium and motion: $V_0 = 0.1$, $\Psi_0^0 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.9$, $n = 1$, with formation of the anticyclone vortex structure

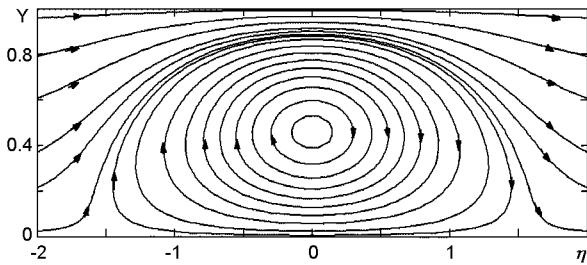


Fig. 1. The isolines of non-dimensional stream function $\Psi = -V_0 y + \Psi_0^2 \operatorname{sech}^2(\kappa\eta) = \text{const}$ (the current lines) in the system of coordinates $V_0 = 0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.9$, $n = 1$ (anticyclone)

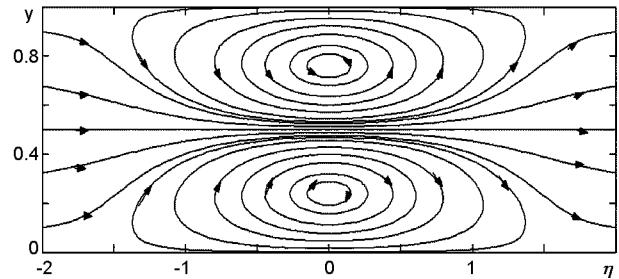


Fig. 3. The current lines in the moving system of coordinates (η, y) : $V_0 = 0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.9$, $n = 2$ (cyclone-jet-anticyclone)

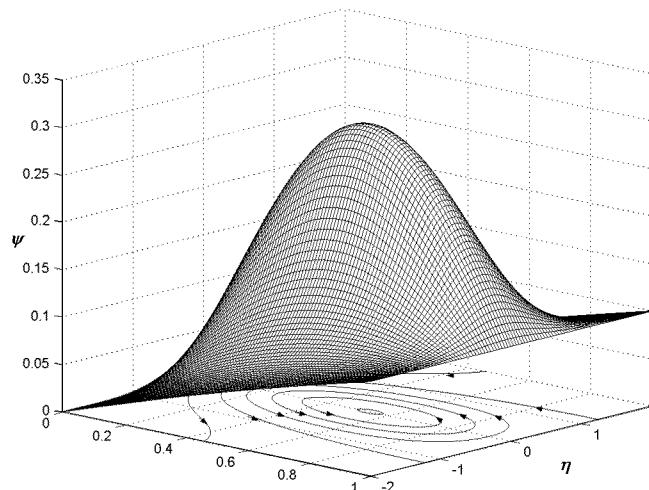


Fig. 2. The level lines of the stream function and the relief of two-dimensional vortex solution in the moving system of coordinates at $V_0 = -0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.5$, $n = 1$ (cyclone)

near the southern boundary of the zonal wind flow in the ionosphere. At $V_0 < 0$ it generates the cyclone vortex (see Fig. 2 where $V_0 = -0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.5$, $n = 1$) near the northern boundary of the wind flow. It is obvious from Figs 3 and 4 that at $n = 2$ in the wind flow of the ionosphere the connected vortex structure will be formed, consisting of cyclone and anticyclone of equal intensity. At $V_0 > 0$ (see Fig. 3 where $V_0 = 0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.9$, $n = 2$) cyclone and anticyclone have the joint zone of maximal velocities (the jet flows). In the case of $V_0 < 0$ (see Fig. 4 where $V_0 = -0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.6$, $n = 2$) the interstructural jet flow is absent and the nonlinear structure represents two-dimensional dipole vortex solution of cyclone-anticyclone character of type [34]. For $n > 2$ the

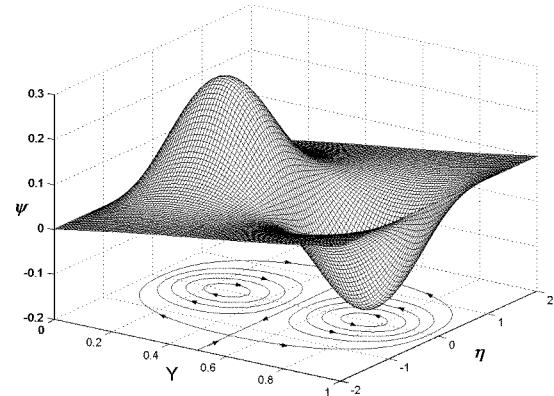


Fig. 4. The level lines of the stream function and the relief of two-dimensional vortex solution in the moving system of coordinates at $V_0 = -0.1$, $\Psi_0^2 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.6$, $n = 2$ (cyclone-anticyclone)

transversal vortex chains will be generated, which consists of n alternating cyclone and anticyclone structures and locating across to the zonal wind (flow) (see Fig. 5).

It must be mentioned that equation (51) has also the exact solution in the form of solitary two connected dipole vortices of cyclonic-anticyclonic type of equal intensity [2, 34] (see Fig. 4); in the form of a regular vortical chain, «cat eyes» [23, 41], and also in the form of the asymmetric solitary vortices at which the stream function depends only on radial coordinate [35]. But for the waves under investigation, possessing zonal asymmetry, as it was already mentioned, more probable is generation of nonlinear vortical structures of considered type (64).

In the dissipative ionosphere ($\Lambda \neq 0$), the vortex is not a stationary wave and, to study the dynamics of the nonlinear structures, it is necessary to use the appropriate equations of transfer. In this case the integral properties of structures, namely, energy E and enstrophy Q (25) and (26) are not conserved and vary with respect to time due to dissipation. In accordance to [3], solutions (64)–(66) can be placed

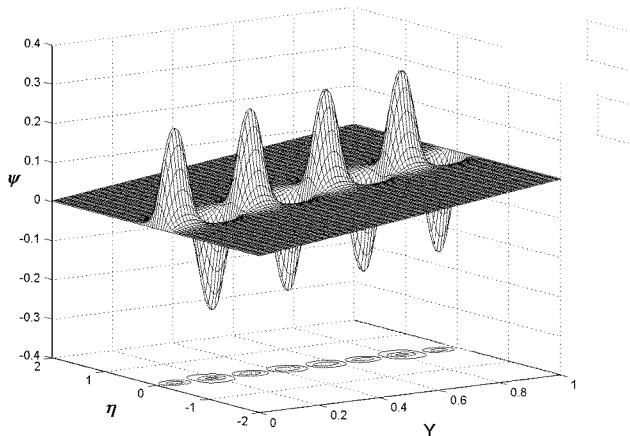


Fig. 5. The level lines of the stream function and the relief of two-dimensional vortex solution in the moving system of coordinates at $V_0 = -0.1$, $\Psi_0^0 = 0.25$, $a_0 = 0.01$, $\alpha_0 = 0.2$, $\beta' = 0.01$, $\kappa_0 = 0.6$, $n = 8$ (transversal vortex chain)

in (25) and (26) within the parameters ψ_0^0 , U and κ , varying slowly with respect to time within the limits of the weak dissipation. In order to analyse the evolution of energy and enstrophy (25) and (26) in the dissipative medium, we estimate the order of integrals:

$$\int (\nabla_{\perp} \psi)^2 dx dy \sim d^{-2} \int \psi^2 dx dy,$$

$$\int (\nabla_{\perp}^2 \psi)^2 dx dy \sim d^{-2} \int (\nabla_{\perp} \psi)^2 dx dy,$$

where d is the characteristic spatial scale of the vortices. If we consider the small-scale vortical structures $d \ll k_0^{-1}$, the energy and enstrophy have the same order of magnitude as the dissipative term, and Eqs (25) and (26) may be rewritten as

$$\partial E / \partial t \approx -2\Lambda E, \quad \partial Q / \partial t \approx -2\Lambda Q. \quad (67)$$

This means that the energy and the enstrophy of these vortices damped exponentially. For the large-scale vortices with $d > k_0^{-1}$, dissipative term in transfer equations (25) and (26) is less than energy and enstrophy, so the relaxation of the vortices proceeds more slowly.

Thus, the large-scale electromagnetic nonlinear vortical structures are long-lived in the ionosphere and, therefore, they can make an important contribution to transfer processes of substance, heat, energy, and formation of strong turbulent state of the medium [1].

5. DISCUSSION OF THE RESULTS AND CONCLUSION

It is shown on the basis of our investigation that in dynamo-region (E-layer) of the ionosphere, with the

S_q currents, Hall conductivity, and wind system, which are inherent in it, a wide class of large-scale, low-frequency electromagnetic wave structures can be generated. First of all, slow MHD waves must be mentioned, on which dynamics of the inhomogeneity of the Coriolis and Ampere forces, does basically not influence. Besides, it is necessary to point out slow Alfvén waves which, in distinction to completely ionized plasma, are decelerated in the ionosphere because of involving neutral components of the medium in fluctuations. And they are connected to the effect of full entrainment of ion components by neutrals in E-region (see the section 2), resulting in transferring perturbations of charged particles to neutral ones. In short-wave limit this wave continuously passes to the helicons. In E-region the slow Alfvén waves have typical periods of 0.5 to 2 hours, wavelengths of the order of 1000 km and phase velocities of the order from 1 to 2 km/s. The waves generate geomagnetic pulsations about 150 nT. The resulted characteristics of the waves well correlate with properties of large-scale, low-frequency slow electromagnetic waves, revealed experimentally [28, 50].

With the decrease of frequencies of the waves the effect of inhomogeneity of the Coriolis and Ampere forces becomes essential. This effect leads to the generation of the planetary, ULF electromagnetic fast and slow modes.

The generation of the slow electromagnetic linear waves, in the ionospheric E-region by the gradient of both geomagnetic field and angular velocities of the Earth's rotation is shown. They propagate in E-region along the latitudinal circles westward and eastward against background of mean zonal wind and are the waves of the Rossby type. The frequency of the slow waves vary in the range of 1 to 100 μ Hz; period of these waves vary in the range from 2 hours to 14 days; wavelength is about 1000 km and longer, the phase velocity has the same order as the local winds, namely, from a few metres per second to one hundred metres per second ($C'_R \approx V \approx 1-100$ m/s). The slow waves experience a strong attenuation by Rayleigh friction between the layers of the local atmosphere and the damping factor is $|\gamma^S| = \Lambda \sim 10^{-5}$ s⁻¹. Though, the attenuation would be weaker for longer large-scale waves with a wavelength of about 10000 km and a timescale of a week or longer. The linear slow waves perturb the magnetic field which has the order of $b_R = |\mu_0 e N C'_R \xi|$ (ξ is transversal shift of the charged particles). For the value of the phase velocity $C'_R = 50$ m/s and $\xi = 1$ km, we have $b_R \approx 1$ nT. Perturbed magnetic field strength increases up to 20 nT, if transversal displacement of the system $\xi = 10$

km and the phase velocity $C'_R \sim 100$ m/s. Thus, the linear slow electromagnetic waves in the dynamo-region are accompanied by the noticeable micro-pulses of the geomagnetic field and have the same order as the micro-pulses caused by S_q currents in the same region. The slow wavy structures (41) can cause observed superrotation (SR) of the upper atmosphere at different layers. These waves were observed in some experiments [13, 14, 37, 48, 56].

The generation of linear fast planetary electromagnetic waves in the ionospheric E-region by the gradient of geomagnetic field and the Hall effect is established. These waves propagate along the latitude against the background of the zonal-mean flow westward and eastward at a speed of a few kilometres per second ($C_B \approx 2-20$ km/s) in the dynamo-region. The waves have a frequency of the order of 0.1 to 100 mHz; periods are in the range from 4 minutes to 6 hours; wavelength is about 1000 km and longer. They attenuate weakly and $|\gamma^f| \sim 0.08\Lambda \sim 10^{-6}$ s⁻¹. The essential micro-pulses of the geomagnetic field caused by the fast waves equal $b_B \approx 12eNC_B\lambda^f \sim 1 \mu\text{T}$. They could be assumed as a new mode of the own oscillations in E-region of ionosphere. Frequencies and phase speeds of fast waves depend on density of the charged particles. Therefore, the phase velocities of fast disturbances in E-region of the ionosphere differ almost by one order of magnitude for daytime and nighttime conditions. High phase velocities as well as their strong change for day and night precludes the identification of these disturbances with MHD waves. The fast waves are caused by oscillations of the electrons completely frozen in the geomagnetic field (see Sect. 2, formulas (8)–(10)), $\partial\mathbf{b}/\partial t = \nabla \times \mathbf{V}_e \times \mathbf{B}_0$, for motionless ions and electrons, $|\mathbf{V}_e| \gg |\mathbf{V}_i| = |\mathbf{V}|$. As, thus $\mathbf{V}_e = \mathbf{V}_D = -\mathbf{j}/eN = -\nabla \times \mathbf{b}/(eN\mu_0)$, for linear waves induction equation (equation of frozen-in) closes on itself and gets the form: $\partial\mathbf{b}/\partial t = \nabla \times \mathbf{B}_0 \times \nabla \times \mathbf{b}/(eN\mu_0)$. The Fourier transformation of this equation recovers the dispersion relation (40).

We investigated dynamics of the slow Alfvén waves in F-region of the ionosphere. It is shown that they can be propagated along the meridian to the north or to the south with phase velocity of order from 2 to 5 km/s. The waves have lengths of order from 1000 to 10000 km and periods in the range from 3 min to 1.5 h. They damp weakly enough with decrement $|\gamma| \approx 10^{-6}$ s⁻¹ and generate magnetic pulsations of about 1 μT . Some experimental observations of similar waves are reported in [22, 28, 50].

It is established that, in the ionospheric F-region, inhomogeneity of the geomagnetic field generates fast

planetary electromagnetic waves, propagating along the latitude circles to the east or to the west with phase velocity $V_{ph} = C_n = 20-1400$ km/s. Frequency of the waves is within limits from 0.001 to 10 Hz and the waves are weakly damped with decrement $|\gamma_n| \approx 10^{-6}$ s⁻¹. The period of perturbations varies in the range from 1 to 110 s. Amplitude of geomagnetic micropulsations generated by these waves is about $b_n \approx b_B \approx 1 \mu\text{T}$. The C_n waves are new modes of eigen oscillations of F-region of the ionosphere. These waves as magnetospheric wave perturbations (MIWP) have been detected in experiments [6, 9, 48, 49]. Measurements of group velocity of these electromagnetic perturbations on the basis of observational data from ionospheric and magnetospheric observatories give the possibility of definition of the zonal wind velocity in F-region of the ionosphere, for the determination of which there not exist yet a direct effective experimental method.

Two eigen-frequencies $\omega = 0$ also have a physical meaning and correspond to hydrodynamic and electromagnetic equilibrium state of the ionospheric medium in a background state where geostrophic wind velocity coincides with electric drift velocity.

In Table, spectra of investigated eigen planetary electromagnetic oscillations of the ionosphere are shown together with decrements of damping and the condition of their existence.

Of special note is the fact that, up to now, in physics of the ionosphere it was supposed that in the ionosphere it can exist basically only the dynamo electric field $\mathbf{E}_d = \mathbf{V} \times \mathbf{B}_0$ caused by a local wind. Our results show that the fast planetary electromagnetic waves under investigation (C_B and C_n waves) can generate intensive large-scale internal vortical electric fields in E-and F-regions of the ionosphere. It is possible to determine size of the field \mathbf{E}_v on the basis of the equation (15):

$$(\nabla \times \mathbf{E}_v)_z \sim \beta' \left(1 - V_{ph}^f/V_{ph}^s \right) V_y, \quad (68)$$

where V_{ph}^f is phase velocity of the fast planetary waves (C_B or C_n waves) and V_{ph}^s is phase velocity of the slow planetary waves C'_R . Taking into account that in E-region of the ionosphere $V_{ph}^f = C_B$, $V_{ph}^s = C'_R$, $\beta' \sim \beta_{B1} \sim B_{0z}/R$ and setting characteristic size of the perturbations along the axis x , $L = \lambda/2\pi$, for the ratio of the vortex $E_{v,y}$ as well as considering that dynamo fields is $E_{d,x} = -V_y B_{0z}$, we obtain from (68):

$$\frac{|E_{v,y}|}{|E_{d,x}|} \approx \frac{L}{R} \frac{|V_{ph}^f|}{|V_{ph}^s|} = \frac{\lambda}{2\pi R} \frac{|C_B|}{|C'_R|}, \quad (69)$$

When $C_B = 20$ km/s and $\lambda = 6000$ km, $|E_{v,y}|/|E_{d,x}| \approx 30$. The values of the dynamo field $E_{d,x} \approx V_y B_{0z}$ and internal vortical electric field $E_{v,y} \approx$

Spectrum of the Large-scale Ultra-Low-Frequency Electromagnetic Waves in the Ionosphere

E-region			F-region		
Frequencies	Conditions of the existence	Decrements of damping	Frequencies	Conditions of the existence	Decrements of damping
Slow MHD waves ($\lambda \leq 1000$ km)					
1. Slow Alfvén waves $\omega_{1,2} = \pm \frac{k_y B_e \sin \theta}{(\mu_0 M N_n)^{1/2}}$ and $\omega'_{1,2} = \omega_{1,2} - \frac{k_x \beta}{k^2}$	$\rho_i/\rho > k^2 c^2 / \omega_p^2$ $(\beta, \beta_{B1,2} \rightarrow 0)$	$\gamma = -\frac{\Lambda}{2}$	1. Slow Alfvén waves $\omega_{1,2} = \pm \frac{k_y B_e \sin \theta}{(\mu_0 M N_n)^{1/2}}$ $\rho_i/\rho \gg k^2 c^2 / \omega_p^2$ $(\alpha, \beta, \beta_{B1,2} \rightarrow 0)$	$\rho_i/\rho \gg k^2 c^2 / \omega_p^2$ $(\alpha, \beta, \beta_{B1,2} \rightarrow 0)$	$\gamma = -\frac{\Lambda}{2}$
2. Slow helicons (whistlers) $\omega_{3,4} = \pm \frac{k k_y B_{0y}}{e N \mu_0}$	$\rho_i/\rho \ll k^2 c^2 / \omega_p^2$ $(\beta, \beta_{B1,2} \rightarrow 0)$	$\gamma = -\frac{\rho_i \omega_p^2}{\rho k^2 c^2} \frac{\Lambda}{2}$	Planetary hydromagnetic gradient waves ($\lambda > 1000$ km)		
3. Fast waves $\omega_{1,2} = \pm \frac{B_e}{e N \mu_0} \frac{(1 + 3 \sin^2 \theta)^{1/2}}{R} k_x$	$k_x^2 \gg \beta'/C_B, \beta/C_B$	$\gamma = -\frac{k_0^2 \Lambda}{k_x^2} \frac{1}{2}$	2. Fast waves $\omega_{1,2} = \pm \omega_n = \pm \frac{B_e}{(\mu_0 M N_n)^{1/2}} \times$ $\times \frac{(1 + 3 \sin^2 \theta)^{1/2}}{R}$ and $\omega'_{1,2} = \pm \frac{\omega_n}{(1 - \omega_R/\omega_n)^{1/2}}$	$\alpha, k_y, \omega_R \rightarrow 0$	$\gamma = -\frac{\Lambda}{2}$
4. Slow waves $\omega_{3,4} = -\beta'/k_x$	$k_x^2 \ll \beta'/C_B, \beta/C_B$	$\gamma = -\Lambda$	$\alpha, k_y \rightarrow 0, \omega_R \neq 0$		

$V_y B_{0z} \lambda C_B / (2\pi R C'_R)$ may also be estimated. For the characteristic values of the E-region parameters, namely, $V_y \sim 50$ m/s, $B_{0z} \sim 64 \mu\text{T}$, $\lambda \sim 10000$ km, $C_B \sim 20$ km/s, $C'_R \sim 50$ m/s, we get $E_{d,x} \sim 1.6$ mV/m and correspondingly, for strength of planetary internal vortical electric field we obtain $E_{v,y} \sim 50$ mV/m (which coincides with the values measured experimentally [10, 51]. Thus, the value of the long-scale internal vortical electric field may be several times greater than the dynamo-field generated in the same ionospheric layer by local wind motion.

Existence of the large-scale fast waves C_B (in E-region), C_n (in F-region) and slow Rossby-type planetary waves C'_R (in both E- and F-regions) are caused by constantly affecting factor, fundamental for ionosphere, namely, spatial inhomogeneity of the geomagnetic field \mathbf{B}_0 . The slow waves are generated by the dynamo field of polarization ($\mathbf{E}_d = \mathbf{V} \times \mathbf{B}_0$) and the fast waves are caused by vortex electric field $\mathbf{E}_v = \mathbf{V}_D \times \mathbf{B}_0$.

Dynamics of the slow planetary electromagnetic waves in the ionosphere are studied experimentally, more or less. Experimental investigation of features of the fast large-scale electromagnetic waves must be realized. Formulas (41) and (47) show that fast electromagnetic large-scale ($L \sim 1000-10000$ km) atmospheric waves both in E- and F-regions of the

ionosphere have general-planetary character and occupy latitudes from the pole ($\theta = 0$) to the equator ($\theta = \pi/2$).

The fast electromagnetic atmospheric waves at ionospheric altitudes can be experimentally revealed and detected using their specific features:

1) a wide range of phase velocity dependence on the latitude (phase velocities of the waves are increased from the pole to the equator; they are doubled at the equator).

2) a high variation (by magnitude) of electron concentration N substantially increases phase velocity of $C_B = \omega_B/k_x$ — waves in E-region of the ionosphere in night conditions (from a few hundred metres per second in daytime to a few ten kilometres per second at night).

3) application of the well-known profiles $N(h)$ allows us to calculate uniquely height distribution of the C_B -waves in E-region of the ionosphere and, conversely, from the height distribution of $C_B(h)$ -waves we can plot the dependence of concentration $N(h)$ on altitude.

4) altitude variation of the neutral component concentration $N_n(h)$ leads to strong increase of the phase velocity of C_n -waves (phase velocity of C_n -waves at heights of 200 to 500 km is increased from a few kilometres per second up to 1000 kilometres per second) in F-region of the ionosphere.

5) response of C_B - and C_n -waves to earthquakes, magnetic storms, artificial explosions and magnetic activity of the Sun.

6) detection of electromagnetic and large-scale (1000—10000 km) character of both C_B - and C_n -waves by world-wide network of ionospheric and magnetospheric observatories.

The self-localization of the planetary electromagnetic waves in the non-dissipative ionosphere is proved on the basis of the analytical solution of the nonlinear dynamic equations (22)—(24). As follows from (64), the solution has the asymptote $\Psi, b_z \sim \exp(-\kappa|x|)$ at $|x| \rightarrow \infty$, so the wave is localized along the Earth's surface (η, y).

The generated nonlinear vortex structures represent a monopolistic (solitary) cyclone (Fig. 1) and/or anticyclone (Fig. 2) or a cyclone — anticyclone pair, connected in a certain manner (Fig. 3) and/or a pure dipole cyclone — anticyclone structure of equal intensity (Fig. 4), rotating in the opposite direction and moving along the latitudinal circles (along the parallels) against the background of the mean zonal wind.

The nonlinear large-scale vortices generate stronger pulses of the geomagnetic field than the corresponding linear waves. Thus, the fast vortices generate the magnetic field $b_v^f \approx 10 \mu T$, and the slow vortices form the magnetic field $b_v^s \approx 100 nT$. The formation of such intensive perturbations can be related to specific properties of the low-frequency planetary structures under consideration. Indeed, they trap environmental particles, and charged particles in E- and F-regions of the ionosphere are completely or partially frozen into the geomagnetic field. That is why the formation of the structures is indicative of the significant densification of the magnetic force lines and, respectively, the intensification of the disturbances of the geomagnetic field in their location. Since the number of captured particles is of the order of the number of passed-by (transient) ones, the perturbation of the magnetic field in the stronger faster vortices would be the same order as of the background field. On the Earth's surface, located R_0 (~ 100 — 300 km) below the region of the wave structure under consideration, the level of the geomagnetic pulses would be less by the factor $\exp(-R_0/\lambda_0)$, here λ_0 is the characteristic length of the electromagnetic perturbations. Since $\lambda_0 \sim (10$ — $100)R_0 \gg R_0$, the magnetic effect on the Earth's surface is less than in E- and F-regions, but in spite of this they are easily detected as well.

The motion of medium particles in the nonlinear vortex structures (64) under study is characterized by nonzero vorticity $\nabla \times \mathbf{V} \neq 0$, i. e., the particle rotate in vortices. The characteristic velocity of this rotation

U_c is of the same order as the vortex velocity U , $U_c \geq U$. In this case the vortex contains the group of trapped particles (the number of these particles is approximately the same as the number of transit particles); rotating, these particles move simultaneously with the vortex structure. Therefore, being long-lived objects, nonlinear planetary-scale electromagnetic vortex structures may play an important role in transporting matter, heat, and energy, and also in driving the macroturbulence of the ionosphere [1]. In particular, the vortex structures that play the role of «turbulent agents» can be treated as elements of the horizontal macroscopic turbulent exchanges in global circulation processes in the ionospheric E- and F-layers. The coefficient of the horizontal turbulent exchange can be estimated from the Obukhov formula [26, 43]: $K_T \approx 0.01d^{4/3} m^2/s$. Thus, for vortices with dimensions of about $d \sim 1000$ km at latitudes of about $\varphi = 50^\circ$ — 55° , we obtain $K_T \approx 3 \cdot 10^6 m^2/s$. This estimate (which can be regarded as an upper one) shows that, in the global exchange processes between high and low latitudes, the meridional heat transport from north to south in the ionospheric E- and F-layers should be of macroturbulence nature (recall that, in the ionosphere, the polar regions are warmer than the equatorial region).

The frequencies of the waves under investigation vary in the band $\omega \sim 10$ — 10^6 Hz and occupy both infrasound and ULF bands. Wavelength is $\lambda \sim 1000$ — 10000 km, period of oscillation is T about of 0.1 s to 14 days. The electromagnetic perturbations from this band are biological active [32]. Namely, they can play an important role as a trigger mechanism of the pathological complications in people having the tendency to hypertension and other diseases. Thus, these waves deserve great attention, as they are a significant source of the electromagnetic pollution of environment.

The fast and slow electromagnetic planetary waves are own degree of freedom of the E and F-regions of the ionosphere. Thus, first of all, the impact on the ionosphere from the top or the bottom (magnetic storms, earthquakes, artificial explosions and so on) induces (or intensifies) the wave structures of these modes [5]. At the certain strength of the source, the nonlinear solitary vortices would be generated [2], which is proved by the observations [16, 39, 46].

Acknowledgement. The investigation described here was supported partially by Award No 3317 of the Georgian Research and Development Foundation (GRDF) and the U. S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF).

1. Aburjania G. D. Structural turbulences and diffusion of plasmas in the magnetic traps // *Plasma Phys. Rep.* — 1990. — **16**. — P. 70—76 (in Russian).
2. Aburjania G. D. Self-organization of acoustic-gravity vortices in the ionosphere before earthquake // *Plasma Physics Report.* — 1996. — **22**. — P. 954—959 (in Russian).
3. Aburjania G. D., Ivanov V. N., Kamenetz F. F. Dynamics of drift vortices in collision plasmas // *Phys. Scripta.* — 1987. — **35**. — P. 677—681 (in Russian).
4. Aburjania G. D., Jandieri G. V., Khantadze A. G. Self-organization of planetary electromagnetic waves in the E-region of the ionosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 2003. — **65**. — P. 661—671.
5. Aburjania G. D., Machabeli G. Z. Generation of electromagnetic perturbations by acoustic waves in the ionosphere // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103A**. — P. 9441—9447.
6. Al'perovich L. G., Drobgev V. I., Kpasnov V. M., et al. Results of simultaneous observations of geomagnetic variations and wave disturbances in the ionosphere // *Radiofizika.* — 1980. — **23**. — P. 763—765 (in Russian).
7. Al'perovich L. S., Drobgev V. I., Sorokin V. M., et al. On the midlatitude oscillations of the geomagnetic field and its connection to the dynamical processes in the ionosphere // *Geomagn. Aeron.* — 1982. — **22**. — P. 797—802 (in Russian).
8. Al'perovich L. S., Ponomarev E. A., Fedorovich G. V. Geophysical phenomena modeling by an explosion: a review // *Izv. Phys. Solid Earth.* — 1985. — **21**. — P. 816—825 (in Russian).
9. Bauer T. M., Baumjohann W., Treumann R. A., et al. Low-frequency waves in the near-Earth plasma sheet // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100A**. — P. 9605—9617.
10. Behnke R. A., Hogfors S. T. Evidence for the existence of night-time region polarization fields at Arecibo // *Radio Sci.* — 1974. — **9**. — P. 211—216.
11. Benney D. J. Long non-linear waves in fluid flows // *J. Math. Phys.* — 1966. — **45**. — P. 52—63.
12. Bostrom R. Dynamics of the Ionosphere // *Cosmical Geophysics.* — Oslo-Bergen-Tromsø: Universitetsforlaget, 1973.
13. Cavalieri D. J. Traveling planetary-scale waves in the E-region // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1976. — **38**. — P. 965—978.
14. Cavalieri D. J., Deland R. J., Poterna J. A., Gavin R. F. The correlation of VLF propagation variations with atmospheric planetary-scale waves // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1974. — **36**. — P. 561—574.
15. Charney J. G., Drazin P. G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* — 1961. — **66**. — P. 83—109.
16. Chmyrev V. M., Marchenko V. A., Pokhotelov O. A., et al. Vortex structures in the ionosphere and the magnetosphere of the Earth // *Planet. Space Sci.* — 1991. — **39**. — P. 1025—1030.
17. Cowling T. C. Magnetohydrodynamics. — New York: Adam Higer Ltd., 1975.
18. Dickinson R. E. Planetary Rossby wave propagating vertically through weak westerly wind wave guides // *J. Atmos. Sci.* — 1968. — **25**. — P. 984—1002.
19. Dickinson R. E. Theory of planetary wave-zonal flow interaction // *J. Atmos. Sci.* — 1969. — **26**. — P. 73—81.
20. Gershman B. I. Dynamics of the Ionospheric Plasma. — Moscow: Nauka, 1974. (in Russian).
21. Gill A. E. Atmosphere-Ocean Dynamics. — London: Academic Press, 1982.
22. Ginzburg V. L. Propagation of the Electromagnetic Waves in the Plasma. — Moskow: Nauka, 1967. (in Russian).
23. Gossard E., Hooke W. Waves in the Atmosphere. — Amsterdam: Elsevier, 1975.
24. Hajkowicz L. A. Global onset and propagation of large-scale travelling ionospheric disturbances as a result of the great storm of 13 March 1989 // *Planet. Space Sci.* — 1991. — **39**. — P. 583—593.
25. Hayakawa M. (Ed.) Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes. — Tokyo: Terra Sci. Publ. Comp., 1999.
26. Holton J. R. The Dynamic Meteorology of the Stratosphere and Mesosphere. — Boston: Amer. Meteor. Soc., 1975.
27. Jacchia L. G. Thermospheric temperature, density and composition: new models // *Spec. Rep. Smithsonian astrophys. obse.* — 1977. — **375**. — P. 1—106.
28. Kamide Y. Electrodynamic Processes in the Earth's Ionosphere and Magnetosphere. — Kyoto: Kyoto Sangyo Univ. Press, 1988.
29. Kelley M. C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. — San Diego: Academic Press, 1989.
30. Khantadze A. G. Determination of the wind field by the pressure gradient field and latitudinal effect of geomagnetic field // *Proc. Inst. Geophys. Acad. Sci. Georgian SSR.* — 1967. — P. 24—29 (in Russian).
31. Khantadze A. G. On the Dynamics of Conductive Atmosphere. — Tbilisi: Nauka, 1973. (in Russian).
32. Kopitenko Yu. A., Komarovskikh M. I., Voronov I. M., Kopitenko E. A. Connection between ULF electromagnetic lithospheric emission and extraordinary behavior of biological systems before the earthquake // *Biofizika.* — 1995. — **40**. — P. 1114—1119 (in Russian).
33. Krall N. A., Trivelpiece A. W. Principles of Plasma Physics. — New York: McGraw-Hill Book Company, 1973.
34. Larichev V. D., Reznik G. M. On the two-dimensional solitary Rossby waves // *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* — 1976. — **231**. — P. 1077—1079 (in Russian).
35. Larichev V. D., Reznik G. M. Strong nonlinear two-dimensional solitary Rossby waves // *Okeanologia.* — 1976. — **16**. — P. 961—967 (in Russian).
36. Long R. Solitary waves in the westerlies // *J. Atmos. Sci.* — 1964. — **21**. — P. 197—200.
37. Manson A. H., Heek C. E., Gregory J. B. Winds and waves (10 min — 30 day) in the mesosphere and lower thermosphere at Saskatoon // *J. Geophys. Res.* — 1981. — **86**. — P. 9615—9625.
38. Newell A. C. Solitons in Mathematics and Physics. — Arizona: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1985.
39. Nezlin M. V., Snejzhkin E. N. Rossby Vortices, Spiral Structures, Solitons. — Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
40. Pedlosky J. Geophysical Fluid Dynamics. — New York: Springer-Verlag, 1978.
41. Petviashvili V. I., Pokhotelov O. A. Solitary Waves in Plasma and in the Atmosphere. — Reading: Gordon and Breach Science Publ., 1992.
42. Pokhotelov O. A., Parrot M., Pilipenko V. A., et al. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources // *Ann. Geophys.* — 1995. — **13**. — P. 1197—1210.
43. Ratcliffe J. A., Weekes K. Physics of the Upper Atmosphere. — New York: Academic Press, 1960.
44. Redecopp L. On the theory of solitary Rossby waves // *J. Fluid Mech.* — 1977. — **82**. — P. 725—745.
45. Rishbeth N. Superrotation of the upper atmosphere // *Geophys. Space Phys.* — 1972. — **10**. — P. 799—819.
46. Shafer L. D., Rock D. R., Lewis J. P., et al. Detection of explosive events by monitoring acoustically-induced geomagnetic perturbations. — Lawrence Livermore Laboratory, CA USA, 1999.—94550, Livermore.
47. Sharadze Z. S., Japaridze G. A., Kikvilashvili G. B., et al. Wavy disturbances of nonacoustical nature in the midlatitude ionosphere // *Geomagn. Aeron.* — 1988. — **28**. — P. 446—451 (in Russian).
48. Sharadze Z. S., Mosashvili N. V., Pushkova G. N., Yudovich L. A., Long-period-wave disturbances in E-region of the ionosphere // *Geomag. Aeron.* — 1989. — **29**. — P. 1032—1034 (in Russian).

49. Sorokin V. M. Wave processes in the ionosphere associated with geomagnetic field // Izv. Vuzov, Radiofizika.—1988.—31.—P. 1169—1179 (in Russian).
50. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. Physics of Slow MHD Waves in the Ionospheric Plasma. — Moskow: Nauka, 1982 (in Russian).
51. Tropley J. D. The ionospheric wind dynamo. 2. Solar tides. Planet. Space Sci.—1970.—18.—P. 1091—1103.
52. Thompson P. D. Numerical weather analysis and prediction. — New York: The Macmillan Company, 1961.
53. Tolstoy I. Hydromagnetic gradient waves in the ionosphere // J. Geophys. Res.—1967.—7.—P. 1435—1442.
54. Whitham G. B. Linear and Nonlinear Waves. — New York: John Wiley, 1977.
55. Williams G. P., Yamagata T., 1984. Geostrophic regimes, intermediate solitary vortices and Jovian Eddies // J. Atmos. Sci.—41.—P. 453—468.
56. Zhou Q. H., Sulzer M. P., Tropley C. A. An analysis of tidal and planetary waves in the neutral winds and temperature observed at low-latitude E-region heights // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 491—505.

МЕХАНІЗМ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОШИРЕННЯ СТРУКТУР УЛЬТРАНІЗЬКОЧАСТОТНИХ ІОНОСФЕРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ПЛАНЕТАРНОГО МАСШТАБУ

Г. Д. Абурдженія, Д. Г. Ломінадзе, А. Г. Хантадзе,
О. А. Харшиладзе

Наведено результати теоретичного дослідження генерації та поширення електромагнітних УНЧ-хвиль планетарного масштабу ($\lambda > 1000$ км) у дисипативній іоносфері. Установлено, що вони генеруються неоднорідностями (широтними варіаціями)

геомагнітного поля в іоносфері та обертанням Землі. Хвилі поширяються вздовж паралелей в обох напрямках. У Е-області швидкі хвилі мають фазові швидкості 2—20 км/с і частоти 0.1—100 мГц; повільні хвилі поширяються зі швидкостями локальних вітрів і мають частоти 1—100 мкГц. У F-області швидкі хвилі мають фазові швидкості від десятків до кількох сотень кілометрів за секунду і частоти 10—0.001 Гц. Повільна мода утворюється динамо електричного поля; вона є узагальненням типових хвиль Россбі в іоносфері, яка обертається, і зумовлена ефектом Холла в Е-шарі. Швидкі збурення — це нові моди, які асоціюються з осциляціями іоносферних електронів, вмерзлих у геомагнітне поле, і пов'язані з виникненням великомасштабного внутрішнього вихрового електричного поля в іоносфері. Великомасштабні хвилі затухають слабо. Теоретичні характеристики узгоджуються із спостережуваними характеристиками великомасштабних УНЧ-осциляцій і магнітоіоносферних хвильових збурень. Установлено, що завдяки силі Коріоліса й електромагнітній силі генерація повільних планетарних електромагнітних хвиль на певній широті в іоносфері може викликати зміну напрямків локальних вітрів і зміну напряму загальної іоносферної циркуляції. Розглянуто ще один тип хвиль, названих повільними магнітогідродинамічними хвильами, на які не впливає неоднорідність сил Коріоліса й Ампера. Ці хвилі виникають як суміш повільних альвенівських пертурбацій і пертурбацій типу вістлера і породжують геомагнітне поле порядку 10—100 нТл і більше. Установлено, що УНЧ-хвилі під час взаємодії з локальними зональними вітрами можуть локалізуватися у вигляді нелінійних одиночних вихорів, що переміщаються вздовж кіл широти як у західному, так і у східному напрямі зі швидкістю, відмінною від фазової швидкості відповідних лінійних хвиль. Вихори затухають повільно й мають довгий термін існування. Вони зумовлюють геомагнітні пульсації, на порядок більші, ніж лінійні хвилі. Вихrovі структури переносять захоплені частки навколошного середовища, а також енергію та теплоту, і тому можуть бути елементами сильної макротурбуленції іоносфери.

УДК 533.951

© О. К. Черемных, А. С. Парновский

Інститут космічних досліджень НАН і НКА України, Київ

БАЛЛОНЫЕ МОДЫ ВО ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ИОНОСФЕРЫ

Досліджується проблема генерації власних МГД-збурень балонного типу у внутрішній магнітосфері Землі у дипольній геомагнітній поля з урахуванням граничних умов на іоносфері. Остання розглядається як тонкий шар зі скінченною провідністю. Основна увага у роботі приділена вивченню впливу провідності іоносфери на стійкість вказаних збурень. Показано, що у наближенні ізольуючої іоносфери у магнітосферній плазмі збуджуються жолобкові збурення, для яких отриманий аналітичний критерій стійкості. У випадку ідеальної провідності іоносфери основним джерелом нестійких МГД-збурень є балонні моди, умова збудження яких є жорсткішою, ніж умова збудження жолобкових мод. Показано, що стійкі тороїдальні альвенівські хвилі слабо затухають за рахунок скінченої провідності іоносфери.

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Ранее в работах [1, 3] было показано, что баллонные возмущения являются естественным видом МГД-возмущений внутренней магнитосферной

плазмы и описываются следующими уравнениями малых колебаний:

$$\Omega^2 \xi + \frac{a(\theta)}{\cos^{13}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{a(\theta) \cos \theta} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} \right] +$$

$$+ \frac{4}{a(\theta)\cos^4\theta} \left(T_0 + \frac{\alpha\beta}{\gamma} \xi \right) = 0, \quad (1)$$

$$\Omega^2 \eta + \frac{1}{\cos^3\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left[\frac{1}{\cos\theta} \frac{\partial\eta}{\partial\theta} \right] = 0, \quad (2)$$

$$\Omega^2 \tau + \frac{1}{\cos^7\theta} \frac{\partial T_0}{\partial\theta} = 0, \quad (3)$$

где

$$T_0 = \beta \left[\frac{1}{\cos^7\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\frac{\cos^{12}\theta}{a(\theta)} \tau \right) - \frac{4\cos^2\theta}{a^2(\theta)} \xi \right],$$

$$a(\theta) = 1 + 3\sin^2\theta, \quad \alpha = -\frac{L}{p} \frac{dp}{dL}, \quad \beta = \frac{\gamma p}{B_0^2}, \quad \gamma = \frac{5}{3}.$$

Здесь L — параметр Мак-Илвайна, B_0 — величина магнитного поля на магнитном экваторе, θ — полоидальный угол, отсчитываемый от магнитного экватора (геомагнитная широта), все остальные обозначения общепринятые. Уравнения (1) и (3) «зацеплены» между собой и описывают взаимодействие полоидальных альвеновских и медленных магнитозвуковых мод. Уравнение (2) описывает тороидальные альвеновские моды. При описании равновесия магнитосферной плазмы пренебрегалось отклонениями геомагнитного поля от дипольного

$$\mathbf{B} = \nabla\Psi \times \nabla\varphi, \quad (4)$$

где Ψ — полоидальный магнитный поток, φ — тороидальный угол (геомагнитная долгота), что справедливо при рассматриваемых конечных давлениях плазмы ($\beta < 1$). Считалось, что равновесие магнитосферной плазмы обеспечивается тороидальным током при отсутствии конвекции и изотропным давлением. При получении уравнений (1)–(3) вектор смещения элемента объема плазмы ξ был представлен в виде

$$\xi = \xi \frac{\nabla\Psi}{|\nabla\Psi|^2} + \eta \frac{\mathbf{B} \times \nabla\Psi}{|\mathbf{B}|^2} + \tau \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2}.$$

Предполагалось, что амплитуды возмущений ξ , η , τ удовлетворяют приближению баллонных возмущений

$$\frac{|\nabla\Psi \cdot \nabla X|}{|\nabla\Psi|}, \frac{|\mathbf{B} \times \nabla\Psi \cdot \nabla X|}{|\mathbf{B}| |\nabla\Psi|} \gg \frac{|X|}{b}, \frac{|\mathbf{B} \cdot \nabla X|}{|\mathbf{B}|}, \quad (5)$$

где b — характерный пространственный масштаб изменения равновесных величин, а X — любое из смещений ξ , η или τ .

Силовые линии геомагнитного поля пересекают поверхность ионосфера, что приводит к электродинамическому взаимодействию магнитосферной и ионосферной плазм. Магнитосферные события обычно слабо влияют на ионосферные процессы. Связано это с тем обстоятельством, что альвенов-

ские волны, играющие роль носителя информации между ионосферой и магнитосферой, распространяются с периодом порядка нескольких минут, в то время как характерные временные масштабы магнитосферных возмущений обычно намного больше одной минуты. По этой причине магнитосфера может быть подвержена влиянию ионосферных процессов, в то время как ее собственным влиянием на ионосферные процессы можно пренебречь. Эти соображения приводят к необходимости учета влияния электродинамических свойств ионосферной плазмы, и в первую очередь ее проводимости, на интересующие нас процессы генерации МГД-возмущений в магнитосфере. Ниже мы учтем это влияние в качестве граничных условий для уравнений, описывающих распространение баллонных возмущений в магнитосфере. Мы выведем эти граничные условия, принимая во внимание наличие двух приземных слоев: изолирующую атмосферу и частично ионизированную ионосферу.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Поскольку размеры магнитосферы существенно превышают размеры ионосферы, то в первом приближении ионосферу можно рассматривать как «жесткий» тонкий в поперечном направлении проводник с конечной проводимостью. Под «жесткостью» мы понимаем условия того, что возмущение не проникает сквозь нижнюю границу ионосферы, т. е. справедливо граничное условие

$$\xi \cdot \mathbf{n}|_b = 0. \quad (6)$$

Здесь \mathbf{n} — внешняя единичная нормаль к ионосферному слою, индекс b означает нижнюю границу ионосферы. Условие (6) описывает вертикальные смещения плазмы и справедливо, в частности, из-за большого количества нейтральных атомов в ионосфере и наличия непроводящей атмосферы.

В качестве второго граничного условия мы используем предположение о сохранении электрического заряда в возмущенной плазменной среде. Применительно к нашей проблеме это предположение означает, что возмущенный ток, текущий в магнитосферной плазме, является источником токов, текущих в ионосферном слое. Граничное условие в этом случае имеет хорошо известный вид [7]

$$\mathbf{J}_M \cdot \mathbf{n}|_b = \nabla_s (\Sigma_s \cdot \mathbf{E}_s)|_b, \quad (7)$$

где \mathbf{J}_M — возмущенный магнитосферный ток, текущий к ионосферному слою, Σ_s — тензор интегральной проводимости ионосферного слоя, индекс s обозначает горизонтальные компоненты тензора

или вектора вдоль ионосферного слоя, \mathbf{E}_S — возмущенное (продольное вдоль слоя) электрическое поле. Индекс b в (7) стоит ввиду малой толщины ионосферы. Входящий в (7) неизвестный тензор Σ_S можно стандартным образом выразить через известный тензор Σ_\perp интегральной проводимости в перпендикулярной силовым линиям магнитного поля плоскости при помощи соотношения

$$\Sigma_S = \mathbf{Q}^{-1} \Sigma_\perp \mathbf{Q}. \quad (8)$$

Здесь \mathbf{Q} — проекционный оператор, однозначно переводящий любой вектор, лежащий в плоскости ионосферы, в вектор, лежащий в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю. Он имеет вид [6]

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I} - \frac{\mathbf{n} \otimes \mathbf{b}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{b}}, \quad (9)$$

где $\mathbf{b} \equiv \mathbf{B}/|\mathbf{B}|$ — единичный вектор, направленный вдоль силовых линий дипольного магнитного поля.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ БАЛЛОНЫХ МОД В ДИПОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

При получении уравнений малых колебаний (1)–(3) было использовано эйкональное приближение, означающее, что любую возмущенную величину X можно представить в виде

$$X = \hat{X} \exp\left(-i\omega t + \frac{i\chi}{\varepsilon}\right), \quad (10)$$

где \hat{X} — медленно изменяющаяся функция координат, а χ — эйконал. Полагая $\varepsilon \ll 1$ и считая, что

$$\mathbf{k}_\perp \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (11)$$

где $\mathbf{k}_\perp = \nabla\chi$, легко убедиться, что условие баллонности (5) выполняется за счет малости ε . В этом случае правая часть уравнения (7) существенно упрощается и приводится к виду

$$\nabla_S \cdot (\Sigma_S \cdot \mathbf{E}_S) \sim \frac{\Sigma_p |\nabla\chi|^2}{\varepsilon},$$

где Σ_p — интегральная проводимость Педерсена. Поскольку правая часть уравнения (6) в главных членах пропорциональна ε^{-1} , то неизвестный параметр ε из граничных условий выпадает. Неизвестная функция в граничных условиях $\nabla\chi$ может быть определена из следующих соображений.

В процессе вывода уравнений (1)–(3) использовалось то обстоятельство [1], что с точностью до членов порядка ε справедливо уравнение

$$\mathbf{k}_\perp \cdot \xi = 0, \quad (12)$$

Из условия (11) и выражения для магнитного поля (4) вытекает, что \mathbf{k}_\perp можно представить в виде

$$\mathbf{k}_\perp = \nabla\chi = k_\varphi \nabla\varphi + k_\psi \nabla\Psi. \quad (13)$$

Тогда условие (12) приводит к уравнению, связывающему амплитуды возмущений полоидальных и тороидальных альвеновских мод:

$$k_\varphi \eta \frac{\mathbf{B} \times \nabla\Psi \cdot \nabla\varphi}{|\mathbf{B}|^2} + k_\psi \xi = 0.$$

Легко показать, что электрическое поле возмущения \mathbf{E} параллельно вектору \mathbf{k}_\perp , т. е. фигурирующие в (13) коэффициенты k_φ и k_ψ определяют поляризацию волны. Таким образом, для каждой силовой линии уравнения (1)–(3) определяют однопараметрическое семейство баллонных возмущений с параметром $\lambda = k_\varphi/k_\psi \in (-\infty; \infty)$. Следовательно, интересующая нас функция $\nabla\chi$ в общем случае определена с точностью до произвольного параметра λ :

$$\nabla\chi = \nabla\Psi + \lambda \nabla\varphi.$$

Поэтому ниже мы рассмотрим два наиболее интересных случая возбуждения баллонных возмущений:

$$k_\varphi = 0, \xi = 0, \tau = 0, \eta \neq 0, \mathbf{E} \parallel \nabla\Psi; \quad (14)$$

$$k_\psi = 0, \eta = 0, \xi \neq 0, \tau \neq 0, \mathbf{E} \parallel \nabla\varphi. \quad (15)$$

Случай (14) описывает распространение хорошо известных тороидальных альвеновских мод [2], а (15) — связанных между собой полоидальных альвеновских и медленных магнитозвуковых мод. Как было показано в работе [5], случай $k_\psi = 0$ ($\lambda \rightarrow \infty$) является наихудшим с точки зрения устойчивости баллонных мод и определяет наиболее мягкие условия возбуждения этих неустойчивых мод.

Из (14), (15) следует, что граничное условие (7) в этих двух случаях будет иметь различный вид. С учетом этого обстоятельства, используя выражение (13) и переходя в (6) и (7) к производным вдоль силовых линий магнитного поля, получаем следующие граничные условия:

— для тороидальных альвеновских мод

$$\Omega\eta + 2i\delta \operatorname{tg}\theta \left. \frac{\partial\eta}{\partial\theta} \right|_{\theta=\pm\theta_0} = 0, \quad (16)$$

где $\delta = c^2/4\pi\Sigma_p\omega_A$, $\omega_A = B_0/L\sqrt{\rho}$ — альвеновская частота, θ_0 — геомагнитная широта точки пересечения магнитной оболочки с верхней границей ионосферы;

— для связанных полоидальных альвеновских и медленных магнитозвуковых мод

$$\Omega\xi + \frac{i\delta}{a(\theta)} \left[2\tg\theta \frac{\partial\xi}{\partial\theta} - \cos^{10}\theta \left(T_0 + \frac{\alpha\beta}{\gamma} \xi \right) \right] \Big|_{\theta=\pm\theta_0} = 0, \\ \xi + 2\tau\cos^2\theta \sin\theta \Big|_{\theta=\pm\theta_0} = 0. \quad (17)$$

Далее мы рассмотрим важные частные случаи тороидальных альвеновских мод с ограниченной проводящей ионосферой ($0 < \Sigma_p < \infty$) и желобковых мод с изолирующей ионосферой ($\Sigma_p = 0$).

ТОРОИДАЛЬНЫЕ АЛЬВЕНОВСКИЕ МОДЫ

Тороидальные альвеновские моды описываются уравнением (2), первоначально полученным в работе [2], и граничным условием (16). Спектр собственных колебаний этих мод, как было показано в работе [1], хорошо описывается приближением ВКБ. Используя это приближение, находим, что спектр собственных колебаний тороидальных альвеновских мод

$$\Omega_n = \frac{n\pi - \frac{i}{2} \ln(1 + 8\delta \tg\theta_0 \cos^7\theta_0)}{\int_{-\theta_0}^{\theta_0} \cos^7\theta d\theta} \quad (18)$$

является слабозатухающим, поскольку для реальной магнитосферы с хорошей точностью выполняется неравенство $\delta \ll 1$.

ЖЕЛОБКОВЫЕ МОДЫ

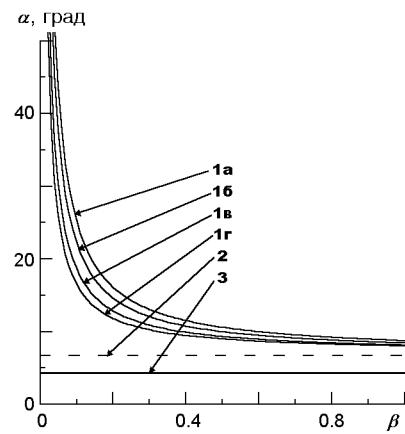
Рассмотрим возмущения, описываемые уравнениями (1), (3) в предположении, что ионосферный слой является изолятором ($\Sigma_p \rightarrow 0$, $\delta \gg 1$). В этом случае, как следует из указанных уравнений и граничных условий (17), в магнитосферной плазме возбуждаются желобковые моды ($\xi = \text{const}$) со следующим условием перехода в неустойчивый режим:

$$\frac{\alpha}{\gamma} \geq \frac{4 \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \frac{\cos^9\theta}{a^2(\theta)} d\theta + \frac{\cos^{10}\theta_0}{a(\theta_0) \sin\theta_0}}{\int_{-\theta_0}^{\theta_0} \cos^7\theta d\theta}. \quad (19)$$

Легко убедиться (см. рисунок), что условие возбуждения желобковых мод (19) является более мягким, чем условие Голда [4]

$$\alpha/\gamma \geq 4.$$

Поскольку в пределе $\Sigma_p \rightarrow \infty$ возбуждаются баллонные моды [1], то можно ожидать, что для



Границы устойчивости магнитосферных МГД-мод: 1а — баллонных мод при $\Sigma_p \rightarrow \infty$ и $\theta_0 = 45^\circ$ ($L = 2$), 1б — $\theta_0 = 50^\circ$ ($L = 2.8$), 1в — $\theta_0 = 60^\circ$ ($L = 4$), 1г — $\theta_0 = 68^\circ$ ($L = 7$), 2 — желобковых мод, критерий Голда (19), 3 — желобковых мод, уравнение (18). Область устойчивости лежит ниже границы, а область неустойчивости — выше

реальной ситуации ионосферной плазмы с конечной проводимостью ($0 < \Sigma_p < \infty$) граница устойчивости МГД-возмущений будет лежать между двумя этими границами (рисунок).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в работе анализ свидетельствует о существенной зависимости границы устойчивости баллонных возмущений от проводимости ионосферы. Показано, что более устойчивая ситуация имеет место в случае, когда проводимость ионосферы близка к идеальной ($\Sigma_p \rightarrow \infty$). В противоположном случае изолирующей ионосфере ($\Sigma_p \rightarrow 0$) может возбуждаться особый класс баллонных возмущений — желобковые моды с более мягким условием перехода в неустойчивый режим. На примере тороидальных альвеновских мод показано, что конечная проводимость ионосферы приводит к слабому затуханию собственных магнитосферных МГД-колебаний.

Отметим, что проведенный нами анализ устойчивости баллонных мод для случаев $\Sigma_p \rightarrow \infty$ и $\Sigma_p \rightarrow 0$ с математической точки зрения соответствует исследованию спектральных свойств самосопряженного оператора. В этом случае нет энергетических потерь от распространения волновых возмущений в ионосфере, и это обстоятельство существенно упрощает анализ спектра. В случае, когда ионосферная плазма обладает конечной проводимостью ($0 < \Sigma_p < \infty$), вопрос об исследовании устойчивости магнито-

сферных МГД-мод становится более сложным [6] и требует, по-видимому, применения модифицированного энергетического принципа для исследования устойчивости.

1. Черемных О. К., Бурдо О. С., Кременецкий И. А., Парновский А. С. К теории МГД-волн во внутренней магнитосфере Земли // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 44—63.
2. Cheng C. Z., Chang T. C., Lin C. A., Tsai W. H. Magnetohydrodynamic theory of field line resonances in the magnetosphere // J. Geophys. Res.—1993.—98, N A7.—P. 11339—11347.
3. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. The theory of ballooning perturbations in the inner magnetosphere of the Earth // Adv. Space Res.—2004.—33, N 5.—P. 769—773.
4. Gold T. Motions in the magnetosphere of the Earth // J. Geophys. Res.—1959.—64.—P. 1219—1226.
5. Hameiri E. The equilibrium and stability of rotating plasmas // Phys. Fluids.—1983.—26.—P. 230—241.
6. Hameiri E. Ballooning modes on open magnetic field lines // Phys. Plasmas.—1999.—6, N 3.—P. 674—685.

7. Hasegawa A., Sato T. Space plasma physics. 1. Stationary Processes. — Springer-Verlag, 1989.—P. 165—170.

BALLOONING MODES IN THE INNER MAGNETOSPHERE OF THE EARTH WITH FINITE IONOSPHERIC CONDUCTIVITY

O. K. Cheremnykh, A. S. Parnowski

We investigate the problem of generation of MHD ballooning eigenperturbations in the inner magnetosphere of the Earth in the dipole geometry of the geomagnetic field with consideration for the ionospheric boundary conditions. The ionosphere is supposed to be a thin layer with finite conductivity. We put the particular attention to the study of the influence of ionospheric conductivity on the stability of the above-mentioned perturbations. It is demonstrated that in the case of insulating ionosphere flute perturbations are generated. An analytical instability criterion for the perturbations is derived. When the ionosphere is conductive, unstable MHD perturbations are provided mostly by ballooning modes. Their instability criterion is stricter than that of flute modes. In the case of resistive ionosphere, stable toroidal Alfvén waves are slowly decaying.

УДК 550.388.2

© Ю. В. Кызыоров

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

О ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ В СПЕКТРАХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ В СПОРАДИЧЕСКОМ Е-СЛОЕ

На прикладі неоднорідностей електронної концентрації, появя яких у середньоширотному спорадичному Е-шарі викликана атмосферною турбулентністю, досліджена можлива залежність форми їхнього одновимірного спектру, що отримується під час ракетних експериментів, від траєкторії польоту ракети. Розглянуто два варіанти траєкторії та два напрями запуску ракети: вздовж осей північ — південь та захід — схід. Вважалось, що ракета перетинає неоднорідний шар двічі, коли рухається вгору та вниз. Показано, що для напряму північ — південь має спостерігатися систематична відмінність у спектрах, які вимірюються на висхідній та низхідній частинах траєкторії. Відмінність виявляється в області великих хвильових чисел, тобто для неоднорідностей, при формуванні яких переважає процес взаємодії заряджених частинок, що занурені в турбулентний потік атмосферного газу, із магнітним полем. Для напряму захід — схід такої відмінності немає.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для ионосферы характерна развитая хаотическая неоднородная структура, которая имеет масштабы от сотен километров до десятков и единиц метров [1]. Изучение такой структуры входит в число актуальных направлений ионосферных исследований [2—8]. К настоящему времени установлено, что в ионосфере появление неоднородностей электронной концентрации может быть связано как с атмосферной турбулентностью на

ионосферных высотах, так и с многочисленными неустойчивостями ионосферной плазмы. В нижней ионосфере из-за больших значений частот столкновений заряженных частиц с молекулами и малой концентрации плазмы по сравнению с концентрацией нейтрального газа развитие неустойчивостей плазменного типа затруднено, плазма является пассивной примесью, а турбулентные движения в ней определяются характером атмосферной турбулентности [4]. Степень неоднородности концентрации в основном зависит от величины турбулентных

скоростей и от высотного градиента концентрации плазмы. Неоднородную структуру ионосферной плазмы характеризуют спектральной плотностью флуктуаций концентрации $S_N(\mathbf{k})$ в интервале $[k, k + dk]$. Средний квадрат таких флуктуаций в области волновых чисел $[k_1, k_2]$ определяют как

$$\langle (\delta N)^2 \rangle = \int_{k_1}^{k_2} d\mathbf{k} S_N(\mathbf{k}). \quad (1)$$

Спектр плазменных неоднородностей нижней ионосфера непосредственно измеряют в ходе ракетных экспериментов [3, 6, 8]. При этом получают одномерный спектр вдоль траектории движения ракеты

$$S_1(k_z) = \int S_N(\mathbf{k}) dk_x dk_y. \quad (2)$$

Так как траектория ракеты имеет форму параболы, то она может дважды пересекать слой неоднородностей — при движении вверх и вниз, измеряя спектр плазменных флуктуаций.

Цель работы — рассмотреть на примере плазменных неоднородностей, которые генерируются атмосферной турбулентностью в спорадическом E -слое, возможную зависимость формы их одномерного спектра, измеряемого в ходе ракетных экспериментов, от траектории полета ракеты.

ОДНОМЕРНЫЙ СПЕКТР ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Чтобы получить формулу одномерного спектра $S_1(k_z)$ неоднородностей концентрации плазмы, вызванных турбулентными движениями атмосферного газа в среднеширотном спорадическом E -слое, обратимся к аналитическому выражению для их трехмерной спектральной плотности $S_N(\mathbf{k})$ [5]. Представим его в несколько упрощенном виде, приняв во внимание два обстоятельства: во-первых, среднеширотный E_s -слой состоит из долгоживущих металлических ионов, и следовательно, можно не учитывать процесс рекомбинации; во-вторых, число Шмидта Sc , отношение коэффициента вязкости газа μ_n к коэффициенту диффузии пассивной примеси D (в нашем случае это коэффициент амбиополярной диффузии плазмы), как и для большинства газообразных сред, можно считать порядка единицы. Тогда выражение для трехмерного спектра принимает форму

$$S_N(\mathbf{k}) = \frac{L_N^{-2} k^{-2} (\mathbf{n} \times \mathbf{k})^2 + \beta_i^2 (\mathbf{b} \times \mathbf{k})^2}{8\pi k^2 (\mu_n k^2 + \varepsilon^{1/3} k^{2/3})^2} E(k). \quad (3)$$

Здесь $L_N = (|\nabla N_0|/N_0)^{-1}$ — характерный масштаб высотного градиента средней концентрации плазмы

∇N_0 (полагаем, что L_N по порядку величины равен толщине L_s E_s -слоя), \mathbf{n} — единичный вектор вдоль направления этого градиента, $\beta_i = \omega_{Bi}/\nu_i$ — отношение гирочастоты ионов $\omega_{Bi} = eB/m_i c$ к их частоте столкновений с нейтральными частицами, $\mathbf{b} = \mathbf{B}/B$ — единичный вектор вдоль направления магнитного поля \mathbf{B} , ε — средняя скорость диссипации энергии турбулентных пульсаций в единице массы атмосферного газа.

Выражением (3) описывается трехмерный пространственный спектр относительных отклонений $\delta N = N_1/N_0$ концентрации плазмы в неоднородностях от ее среднего значения. Рассматриваемые масштабы неоднородностей меньше L_N и соответствуют инерционному интервалу турбулентности: $k_0 < k < k_d$, где k_0 — величина, обратная внешнему масштабу турбулентности L_0 (в нашем случае это характерный масштаб сдвигового течения атмосферного газа, формирующего спорадический слой; очевидно, что $L_0 > L_s$), $k_d = (\mu_n^3/\varepsilon)^{-1/4}$ — величина, обратная внутреннему масштабу турбулентности, то есть масштабу наименьших вихрей, ответственных за вязкую диссипацию. В инерционной области турбулентности спектральная плотность $E(k)$ средней кинетической энергии единицы массы атмосферного газа описывается законом Колмогорова — Обухова:

$$E(k) = C_1 \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (4)$$

где C_1 — безразмерная постоянная (согласно современным экспериментальным данным $C_1 \approx 1.5$) [9].

Проинтегрировав (3) по поверхности сферы радиуса k в пространстве волновых векторов, получим следующее выражение для оценки среднего квадрата относительных флуктуаций электронной концентрации, вызванных турбулентными движениями атмосферного газа в E_s -слое:

$$\langle (\delta N)^2 \rangle = \int_{k_1}^{k_2} d\mathbf{k} S_N(\mathbf{k}) = \int_{k_1}^{k_2} dk S_0(k), \quad (5)$$

где

$$S_0(k) = \int S_N(\mathbf{k}) k^2 \sin\theta d\theta d\varphi = \frac{L_N^{-2} + \beta_i^2 k^2}{3k^3 (1 + (k/k_d)^{4/3})^2} \quad (6)$$

— одномерный ненаправленный спектр плазменных неоднородностей.

При заданных параметрах E_s -слоя и атмосферной турбулентности в окрестности высоты $H_s = 97$ км:

$$L_N = L_s = 2 \text{ км}, \quad \mu_n = 10.4 \text{ м}^2/\text{с}, \quad \beta_i = 0.016,$$

$$\varepsilon = 0.1 \text{ м}^2/\text{с}^3, \quad k_d^{-1} = (\mu_n^3/\varepsilon)^{1/4} \approx 10.2 \text{ м},$$

для области масштабов неоднородностей $k_d^{-1} < l < 400$ м с помощью (5) получаем оценку относи-

тельного отклонения возмущенной концентрации электронов от среднего значения $\langle \delta N^2 \rangle^{1/2} = \langle (N_1/N_0)^2 \rangle^{1/2} \approx 7\%$

Выражение для одномерного спектра $S_1(k_z)$ плазменных неоднородностей вдоль заданного направления z , можно получить интегрированием $S_N(k)$ по k_x, k_y (см. (2)) или по k_\perp, φ , если использовать цилиндрическую систему координат k_\perp, φ, k_z :

$$S_1(k_z) = \int_0^{(k_d - k_z)^{1/2}} k_\perp dk_\perp \int_0^{2\pi} S_N(k) d\varphi, k_0 < k_z < k_d. \quad (7)$$

После подстановки (3) в (7) и интегрирования по φ получаем

$$S_1(k_z) = \int_0^{(k_d - k_z)^{1/2}} \frac{L_N^{-2} f(k_\perp, k_z, A_1) + \beta_1^2 k^2 f(k_\perp, k_z, A_2)}{8k^7 (1 + (k/k_d)^{4/3})^2} k_\perp dk_\perp, \quad (8)$$

где A_1 — угол между векторами z и n , A_2 — между z и b , $k^2 = k_\perp^2 + k_z^2$,

$$f(k_\perp, k_z, A) = k_\perp^2 + 2k_z^2 + (k_\perp^2 - 2k_z^2) \cos^2 A.$$

Одномерный спектр (8) может быть получен в ходе прямых ракетных экспериментов, при этом вектор z указывает направление движения ракеты.

ВОЗМОЖНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕРЯЕМОГО СПЕКТРА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОТ ТРАЕКТОРИИ

Траектория ракеты, используемой для измерения спектра неоднородностей, имеет форму параболы и может быть представлена зависимостью высоты полета ракеты H от дальности по горизонтали R :

$$H = H_m [1 - (2R/R_m - 1)^2]. \quad (9)$$

Здесь H_m — максимальная высота, а R_m — максимальная дальность полета ракеты.

Два возможных варианта траектории ракеты схематически изображены на рис. 1: линия 1 — это траектория при $H_{m1} = 180$ км, $R_{m1} = 280$ км [3] а линия 2 — при $H_{m2} = 128.7$ км, $R_{m2} = 80$ км [6]. Пунктирной линией на рис. показан спорадический слой, а наклонными линиями — направление магнитного поля (здесь предполагается, что пуски ракет осуществляются с севера на юг в геомагнитной системе координат, магнитное наклонение — 45° ; если запуск ракет будет происходить с запада на восток, то необходимо соответственно повернуть на 90° линии, указывающие направление магнитного поля). Траектория ракеты пересекает E_s -слой на расстоянии по горизонтали от точки старта для первого варианта траектории 45 и 235 км, а для второго — 20 и 60 км. В таблице представлены

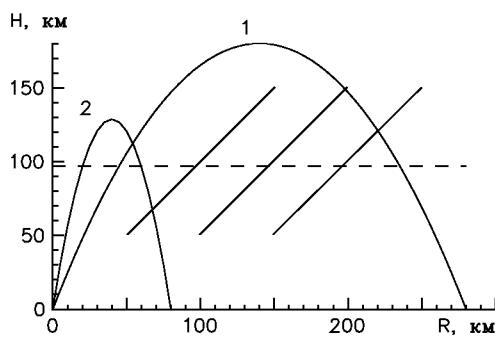


Рис. 1. Траектории полета ракеты через спорадический E -слой (пунктирная линия) в направлении север — юг: линия 1 — траектория при $H_{m1} = 180$ км, $R_{m1} = 280$ км [3], линия 2 — при $H_{m2} = 128.7$ км, $R_{m2} = 80$ км [6]

Результаты расчета углов A_1 и A_2 в точках пересечения ракетой спорадического E -слоя при движении вверх ($A_{1\uparrow}, A_{2\uparrow}$) и вниз ($A_{1\downarrow}, A_{2\downarrow}$) для двух вариантов траекторий и направлений запуска: север — юг и запад — восток

Номер траектории	$A_{1\uparrow}$	$A_{1\downarrow}$	$A_{2\uparrow}$ С — Ю	$A_{2\downarrow}$ С — Ю	$A_{2\uparrow}$ З — В	$A_{2\downarrow}$ З — В
1	30°	150°	164.8°	74.8°	128°	52°
2	17.4°	162.6°	152.4°	62.4°	132.4°	47.6°

результаты расчета углов A_1 и A_2 в точках пересечения ракетой спорадического слоя при движении вверх и вниз для обеих траекторий и двух направлений запуска: север — юг и запад — восток (при таком изменении направления запуска ракеты и при вертикальном градиенте фоновой концентрации электронов угол A_1 не изменяется).

По расчетным значениям углов A_1 и A_2 (см. таблицу) с помощью (8) получены формы одномерного спектра $S_1(k_z)$, который может быть измерен ракетой при движении вверх и вниз для направления север — юг и запад — восток. Результаты представлены на рис. 2, где показан также ненаправленный одномерный спектр $S_0(k)$, а пунктирной линией — зависимость $k^{-5/3}$. На рис. 2, а линия 1 соответствует спектру $S_1(k_z)$ при движении ракеты вверх, а линия 2 — $S_1(k_z)$ при движении вниз для первого варианта траектории и направления север — юг. Спектры совпадают в области малых волновых чисел, так как $\cos^2 A_{1\uparrow} = \cos^2 A_{1\downarrow}$, и различаются при больших, так как $\cos^2 A_{2\uparrow} > \cos^2 A_{2\downarrow}$. На рис. 2, б представлен спектр $S_1(k_z)$ для того же варианта траектории, но для направления запад — восток. В данном случае $\cos^2 A_{1\uparrow} = \cos^2 A_{1\downarrow}$ и $\cos^2 A_{2\uparrow} = \cos^2 A_{2\downarrow}$, поэтому ожидаемая форма спектра остается неизменной. Форма спектра $S_1(k_z)$ для второго варианта

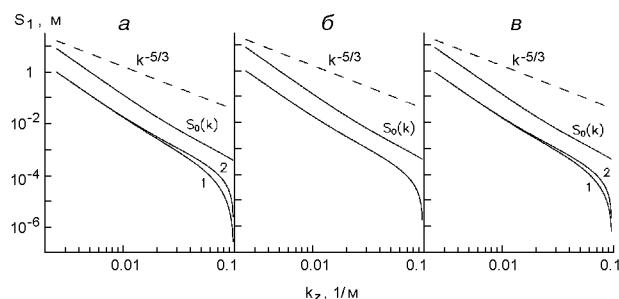


Рис. 2. Ожидаемый согласно (8) спектр неоднородностей, который можно получить с помощью ракеты, движущейся через E_s -слой: а — первый вариант траектории, направление север — юг, (1 — вверх, 2 — вниз); б — первый вариант траектории, запад — восток; в — второй вариант траектории, север — юг (1 — вверх, 2 — вниз)

траектории и направления север — юг показана на рис. 2, в линией 1 при движении ракеты вверх, а линией 2 — вниз. Здесь, как и на рис. 2, а, имеет место совпадение в области малых и различие при больших волновых числах, которое несколько меньше, так как разница между $\cos^2 A_{2\uparrow}$ и $\cos^2 A_{2\downarrow}$ для второй траектории меньше. При ориентации второй траектории вдоль оси запад — восток, как и для первого варианта, будет иметь место совпадение спектра $S_1(k_z)$, полученного при полете ракеты вверх, со спектром, измеренным при движении вниз. Во всех рассмотренных случаях параметры турбулентности и E_s -слоя в местах пересечения его ракетой предполагались одинаковыми.

ВЫВОДЫ

Одномерный спектр неоднородностей электронной концентрации, которые формируются атмосферной турбулентностью в среднеширотном спорадическом E -слое, можно описать выражением (8). Такой одномерный спектр измеряют экспериментально с помощью ракеты, которая может дважды пересекать неоднородный E_s -слой при движении вверх и вниз. Для двух вариантов траектории (см. рис. 1) и двух направлений: север — юг и запад — восток была выполнена оценка формы спектра $S_1(k_z)$, который можно получить на обоих участках полета ракеты. Оказалось, что как для первого варианта, так и для второго на обоих участках полета (вверх и вниз) ожидаемая форма спектра $S_1(k_z)$ неизменна для направления запад — восток. При пуске ракет вдоль линии север — юг имеет место систематическое различие в одномерных спектрах, измеряемых на восходящей и нисходящей частях траектории полета (см. рис. 2, а и в). Различие обнаруживает-

ся в области больших волновых чисел, то есть для неоднородностей, при формировании которых преобладающим является процесс взаимодействия заряженных частиц, погруженных в турбулентный поток атмосферного газа, с геомагнитным полем. Указанное различие заметнее для первого варианта траектории.

Полученный результат представляется важным как для подготовки ракетных экспериментов, направленных на исследование неоднородностей электронной концентрации в нижней ионосфере, так и для интерпретации данных таких экспериментов.

- Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. — М.: Наука, 1984.—392 с.
- Fejer B. G., Kelley M. C. Ionospheric irregularities // Rev. Geophys. and Space Phys.—1980.—18, N 2.—P. 401—454.
- Fukao S., Yamamoto M., Tsunoda R. T., et al. The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) campaign // Geophys. Res. Lett.—1998.—25, N 11.—P. 1761—1764.
- Gurevich A. V., Borisov N. D., Zybin K. P. Ionospheric turbulence induced in the lower part of the E region by the turbulence of the neutral atmosphere // J. Geophys. Res.—1997.—102A, N 1.—P. 379—388.
- Kyzyurov Yu. V. On the spectrum of mid-latitude sporadic-E irregularities // Ann. Geophys.—2000.—18, N 10.—P. 1283—1292.
- Pfaff R. F., Sahr J., Providakes J. F., et al. The E-region Rocket/Radar Instability Study (ERRIS): scientific objectives and campaign overview // J. Atmos. Terr. Phys.—1992.—54, N 6.—P. 779—808.
- Rose G., Schlegel K., Rinnert K., et al. The ROSE project. Scientific objectives and discussion of first results // J. Atmos. Terr. Phys.—1992.—54, N 6.—P. 657—667.
- Shlegel K. Measurements of electron density fluctuations during the ROSE rocket flights // J. Atmos. Terr. Phys.—1992.—54, N 6.—P. 715—723.
- Yoshizawa A., Itoh S.-I., Itoh K., Yokoi N. Turbulence theories and modelling of fluids and plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion.—2001.—43, N 3.—P. R1—R144.

ON POSSIBLE CHANGES IN ELECTRON-DENSITY IRREGULARITY SPECTRA OBTAINED DURING ROCKET EXPERIMENTS IN SPORADIC-E

Yu.V.Kyzyurov

It is well known that electron-density irregularities in the mid-latitude sporadic- E are induced by atmospheric turbulence. We investigate a rocket trajectory dependence of the form of their one-dimensional spectrum which can be derived during rocket experiments. Two possible trajectories for two directions (north-south and west-east) of rocket flights are considered. It is assumed that a rocket intersects the irregular layer twice, during ascent and descent. It is shown that a systematic difference between the spectra measured during the upleg and downleg portions of trajectories is bound to be observed in the case of the southward direction. The difference is found in the range of large wave numbers, for the irregularities mainly generated through the interaction of plasma involved in turbulent motions of the atmospheric gas with the magnetic field. In the case of eastward direction of rocket trajectories, no difference can be observed.

© Ю. Г. Рапопорт

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Інститут космічних досліджень Національної академії наук і Національного космічного агентства України

НОВАЯ ФОТОХИМИЧЕСКИ-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМОИОНОСФЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Электростатичне поле та іоносферні параметри визначено в системі літосфера — атмосфера — іоносфера. Нова модель пояснює спостережувані варіації приземного електричного поля перед сильними землетрусами.

Введение и формулировка задачи. В течение последнего времени появились сообщения о ряде экспериментов, подтверждающих наличие электростатически-фотохимического и акусто-гравитационного каналов передачи энергии в системе литосфера — атмосфера — ионосфера (ЛАИ); примером этого являются вариации характеристик электромагнитных волн в волноводе «земля — ионосфера» перед землетрясениями. Уменьшение приземного вертикального электрического поля с изменением его знака и вариациями с характерными периодами 0.5—2 ч наблюдались перед сильными землетрясениями [3]. Приземный сторонний ток, (который может быть связан с наличием заряженных аэрозолей) с амплитудой $J_{\text{ext}} \sim 10^{-12} \dots 10^{-9} \text{ A/m}^2$ [8] (рис. 1) включен в настоящую трехмерную электростатически-фотохимическую модель [5] и исследованы вариации фотохимических и ионосферных параметров под влиянием электрического поля. Такие процессы описываются уравнениями [5—8]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\hat{\mathbf{E}}) &= -\operatorname{div}\mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\varphi, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{2}{3} \operatorname{Re}(\sigma_{ij} E_i E_j) / (N_e T_{e0} \theta) - \delta(\theta) \nu_e(\theta) (\theta - 1), \\ \theta &\equiv T_e / T_{e0}, \\ N_e / N_{e0} &\approx \sqrt{\frac{(\lambda_0 \alpha_i + \alpha_{D0})(1 + \lambda_0)}{(\lambda(\theta) \alpha_i + \alpha(\theta))(1 + \lambda(\theta))}}, \\ \lambda(\theta) &\approx \beta(\theta) / \gamma. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь φ — электростатический потенциал, T_e — электронная температура, N_e — концентрация электронов, индекс «0» относится к равновесному состоянию в отсутствие стороннего тока ($J_{\text{ext}} = 0$),

λ — отношение концентраций отрицательных ионов и электронов, α_i , α_D , β и γ — коэффициенты ион-ионной и диссоциативной рекомбинации, электронного прилипания и отлипания от отрицательных ионов соответственно; $\hat{\mathbf{E}}$ — тензор ионосферной проводимости в наклонном геомагнитном поле, δ — доля энергии, передаваемой при столкновении электронов с нейтралами. Принята следующая форма пространственного распределения приземного стороннего тока:

$$\mathbf{J}_{\text{ext}} = J_{\text{ext}} \mathbf{e}_z \exp \left[- \left(\frac{z}{\Delta z} \right)^2 - \left(\frac{x - x_c}{\Delta x} \right)^2 - \left(\frac{y - y_c}{\Delta y} \right)^2 \right],$$

$$x_c = y_c = 0.$$

Здесь Δx , Δy , Δz — горизонтальные (в направлениях X , Y) и вертикальные (в направлении Z) масштабы пространственного распределения, \mathbf{e}_z — единичный вектор в вертикальном направлении. Заданы разность потенциалов на верхней ($Z = 150$ км) и нижней ($Z = 0$) границах и периодические граничные условия в горизонтальной плоскости [5]). Направление «тока ясной погоды» принято за положительное.

Результаты моделирования. Показано, что в отсутствие стороннего тока увеличение приземной проводимости вызывают уменьшение приземного и увеличение ионосферного вертикального электрического поля. Это качественно совпадает с результатами [4]. На основании уравнений (1) определены электрическое поле (рис. 1, б, 2, 3) и фотохимические стационарные параметры [5] (рис. 5). Для $J_{\text{ext}} = 0 \dots 10^{-10} \text{ A/m}^2$ зависимость приземного поля $E_{z=0}$ от J_{ext} почти линейна: $E_{z=0} = E_{z0} - \alpha J_{\text{ext}}$, где $E_{z0} \approx 93.6 \text{ В/м}$, $\alpha \approx 15.3 \text{ В}\cdot\text{м}/\text{А}$. Когда J_{ext}

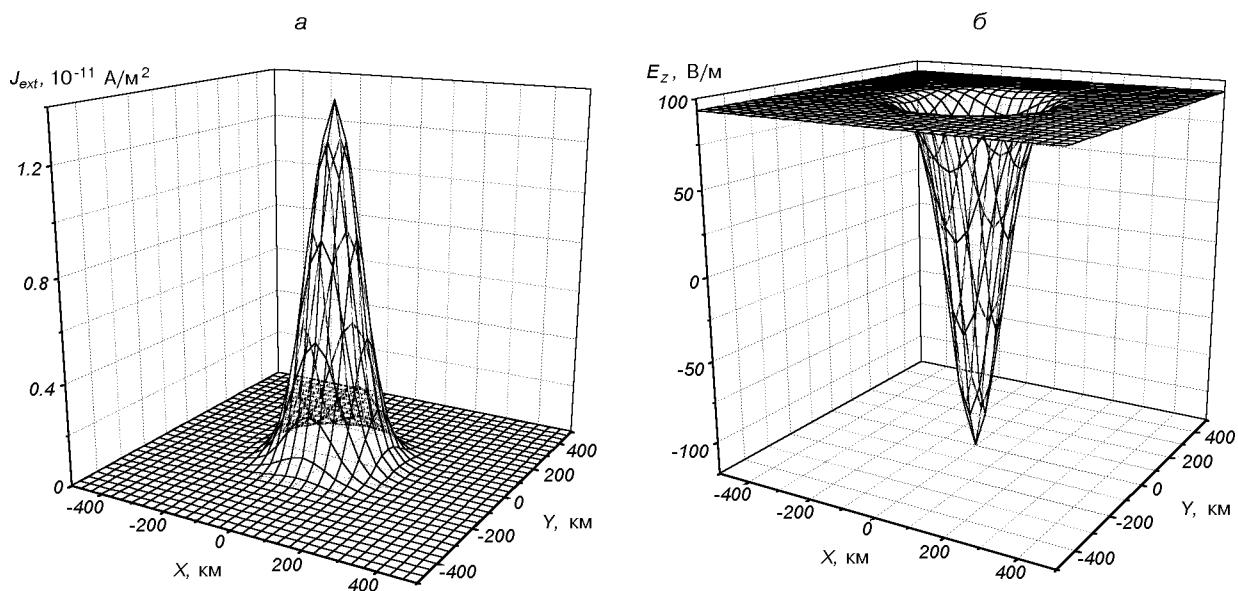


Рис. 1. Пространственное распределение стороннего тока в горизонтальной плоскости на уровне Земли (а) и — приповерхностного вертикального электрического поля (б) при отношении проводимостей $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км}) = 10^{-4}$, $\Delta Z = 5 \text{ км}$

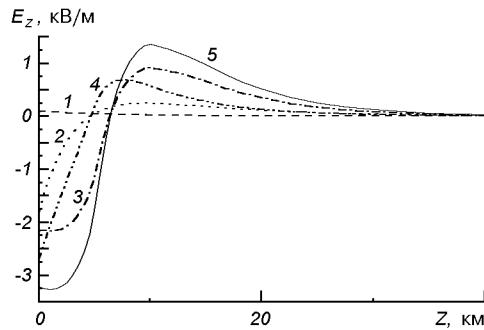


Рис. 2. Распределение по высоте Z вертикального электрического поля при $X = Y = 0$ для высот $Z = 0 \dots 40 \text{ км}$: 1 — $J_{ext} = 0$, $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км}) = 10^{-4}$; 2 — $\Delta Z = 5 \text{ км}$, $J_{ext} = 10^{-9} \text{ А/м}^2$, $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км}) = 10^{-3}$; 3 — $J_{ext} = 10^{-9} \text{ А/м}^2$, $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км}) = 10^{-3}$, $L(\sigma) = 5 \text{ км}$, $\Delta Z = 5 \text{ км}$; 4 — $L(\sigma) = 5 \text{ км}$, $\Delta Z = 2 \text{ км}$, $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км}) = 10^{-3}$, $J_{ext} = 10^{-9} \text{ А/м}^2$; 5 — $L(\sigma) = 5 \text{ км}$, $\Delta Z = 5 \text{ км}$, $J_{ext} = 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ А/м}^2$

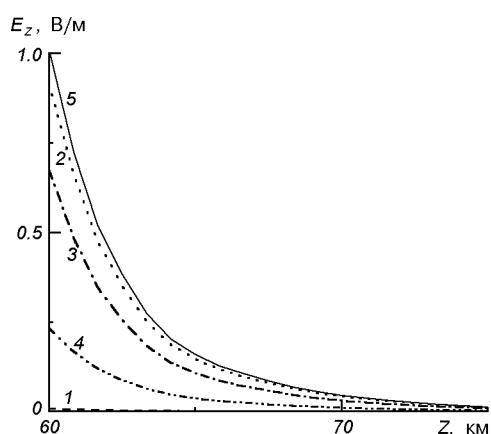


Рис. 3. То же для высот $Z = 60 \dots 75 \text{ км}$

достигает 10^{-11} А/м^2 , а отношение проводимостей при $Z = 0$ и $Z = 60 \text{ км}$, $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км}) \sim 10^{-4}$ (рис. 1) имеет место обращение знака электрического поля, что в действительности наблюдается перед сильными землетрясениями [3] (рис. 1—3). Проникновение значительного электрического поля в ионосферу (порядка 1 В/м в нижней D-области и нескольких миливольт на метр на высоту $Z = 80 \text{ км}$) (рис. 2, 3, кривые 2—5) возможно ночью при условии увеличения приземной проводимости (и отношения $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км})$) на порядок (рис. 4, кривые 2, 3). При увеличении σ на порядок на поверхности Земли и уменьшении характерного масштаба распределения $\sigma(Z)$ до $L_\sigma = 5 \text{ км}$ (кривая

2 на рис. 4), величина E_z в ионосфере уменьшается в 1.5 раз (сравните кривые 2 и 3 на рис. 3). Заметные вариации нормированных значений (рис. 5) электронной температуры T_e/T_{e0} , концентрации N_e/N_{e0} , частоты столкновений ν_{en}/ν_{en0} , статической проводимости σ_e/σ_{e0} и отношения концентраций отрицательных ионов и электронов λ_e/λ_{e0} (T_{e0} , N_{e0} , ν_{en0} , σ_{e0} и λ_{e0} относятся к стационарному состоянию при $J_{ext} = 0$) в диапазоне высот нижней атмосферы могут наблюдаться при сторонних токах с плотностями порядка 10^{-9} А/м^2 и отношении $\sigma(0)/\sigma(60 \text{ км})$ порядка 0.001. Уменьшение характерного масштаба ΔZ вертикального распределения стороннего тока ведет к заметному уменьшению

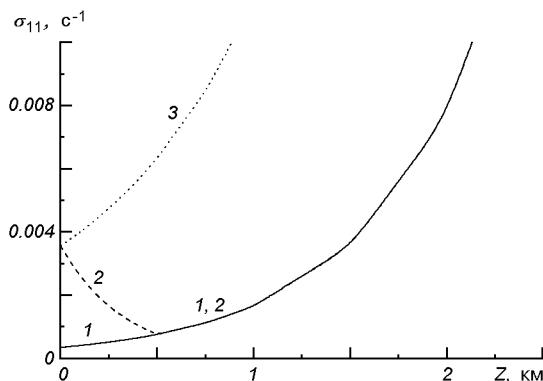


Рис. 4. Зависимость элемента тензора проводимости $\sigma_{11} = \sigma_{XX}$ от высоты Z ; в атмосфере и нижней ионосфере проводимость изотропная ($\sigma \approx \sigma_{11}$); 1 — распределение проводимости, соответствующее кривой 1 на рис. 2, 3; 2 — распределение проводимости, соответствующее кривым 3—5 на рис. 2, 3; 3 — распределение проводимостей, соответствующее кривой 2 на рис. 2, 3. При $Z > L_e = 5$ км кривая 2 совпадает с кривой 1. Все кривые совпадают при $Z = 60$ км

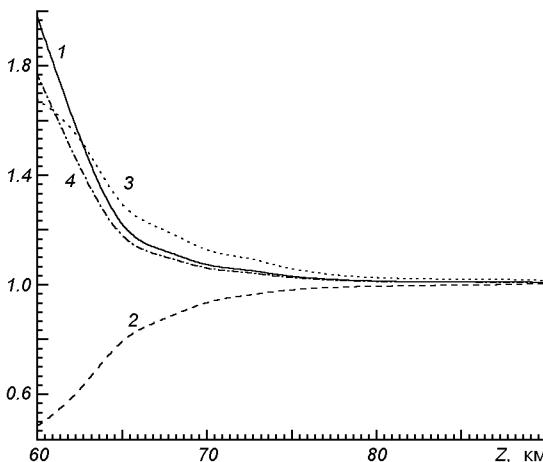


Рис. 5. Распределение по высоте Z нормированных значений: 1 — электронной температуры T_e/T_{e0} , 2 — концентрации N_e/N_{e0} , 3 — отношения λ_e/λ_{e0} концентраций отрицательных ионов и электронов, 4 — частоты столкновений v_{en}/v_{en0} с параметрами, соответствующими кривой 5 на рис. 2 и 3.

поля E_z , проникающего в ионосферу (ср. кривые 3 и 4 на рис. 3). Грубая оценка на основе квазистатических уравнений (не приведенных здесь) показывает, что если период гармонических осцилляций стороннего тока равен одному часу, вариации приземного электрического поля с амплитудой 100 В/м имеют место при амплитуде тока порядка 10^{-11} А/м². Значительное электрическое поле (до нескольких В/м), обнаруженное в D области ионосферы, объясняется в работе [1] наличием сильного (порядка 10^{-9} — 10^{-8}) А/м²) стороннего тока в мезосфере. Расчет на основании настоящей модели показыва-

ет, что если при наличии стороннего тока с максимумом на высоте $Z = 55$ км и $\Delta Z = 10$ км появляется дополнительный приземный сторонний ток и повышается приземная проводимость, то абсолютная величина электрического поля при $Z = 60$ км и электронная температура уменьшаются, в отличие от ситуации на рис. 5, когда сторонний ток есть только вблизи поверхности Земли. Этот результат качественно совпадает с результатами [1]. В то же время модельные статическое поле и квазистатические вариации приземного электрического поля хорошо согласуются с результатами наблюдений [2, 3].

Автор благодарен Ю. М. Михайлову и Г. А. Михайловой за плодотворную дискуссию.

1. Гоков А. М., Мартыненко С. И., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. Мощные удаленные землетрясения и крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере // Тр. В Российской конф. по атмосферному электричеству. — Владимир: Владимир. гос. ун-т, 2003.—С. 87—89.
2. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Дружин Г. И., Капустина О. В. Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия.—2004.—44, № 2.—С. 245—253.
3. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В. и др. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—43, № 3.—С. 422—428.
4. Bliokh P. Variations of the electric fields and currents in low ionosphere produced by air conductivity grows over region of forthcoming earthquake // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2.—С. 146—151.
5. Grimalsky V. V., Hayakawa M., Ivchenko V. N., et al. Penetration of an electrostatic field from the lithosphere into the ionosphere and its effect on the D-region before earthquakes // J. Atmos. and Terr. Phys.—2003.—65.—P. 391—407.
6. Martinenko S. I., Fuks I. M., Shubova R. S. Ionospheric electric-field influence on the parameters of VLF signals connected with nuclear accidents and earthquakes // J. Atmos. Electricity.—1996.—16.—P. 259—269.
7. Rapoport Y., Grimalsky V., Hayakawa M., et al. Change of ionospheric plasma parameters under the influence of electric field which has lithospheric origin and due to radon emanation. // Phys. and Chem. Earth.—2004.—29.—P. 579—587.
8. Sorokin V. M., Chmyrev V. M., Yaschenko A. K. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling // J. Atmos. and Terr. Phys.—2001.—63.—P. 1681—1691.

NEW PHOTOCHEMISTRY-ELECTROSTATIC MODEL OF SEISMOIONOSPHERIC COUPLING AND VARIATIONS OF NEAR-GROUND QUASISTATIC ELECTRIC FIELD BEFORE EARTHQUAKES

Yu. G. Rapoport

Quasistatic electric field and ionospheric parameters are determined in the system «lithosphere-atmosphere-ionosphere» (LAI). This model explains the observed variations of near-ground electric field before strong earthquakes.

© В. Г. Бахмутов

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИЗМЕНЕНИЕМ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И КЛИМАТА В ЕВРОПЕ

На основі нових палеомагнітних даних по території північно-східної Європи розраховано траекторію дрейфу віртуального геомагнітного полюса за останні 13 тис. років. Проведено її аналіз відносно даних про зміни палеотемператур, які зумовлюють основні закономірності зміни ландшафтно-кліматичних періодів і фаз на території центральної — північно-східної Європи. Встановлено, що чергування холодних і теплих періодів пов'язане з віддаленням-наближенням геомагнітного полюса до території Європи. Підтверджено зв'язок між збуреністю геомагнітного поля, обумовленою сонячною активістю, і атмосферною циркуляцією. Зроблено висновок, що положення геомагнітного полюса і корпускулярне сонячне випромінювання вносять суттєвий вклад у формування атмосферної циркуляції у північній півкулі.

ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость пространственно-временной структуры магнитного поля Земли (МПЗ) — одна из наиболее характерных его особенностей. Она обусловлена как глубинными процессами, протекающими в земном ядре и на границе ядро — мантия, так и процессами в магнитосфере, в основном обусловленными солнечным волновым и корпускулярным излучением.

На сегодняшний день можно считать установленным фактом, что изменения МПЗ с периодами порядка миллионов и сотен миллионов лет отражают перестройку конвекции в мантии, которая определяет перемещение плит, а значит, изменение координат различных частей суши. Естественно, что климат на этих частях суши коренным образом изменяется. Рассматриваемые ниже закономерности имеют другие характеристические времена, которые по временному масштабу условно можно разделить на две части. Первая — от сотен и первые тысячи лет, а вариации МПЗ обусловлены процессами в ядре Земли и на границе ядро — мантия, вторая — от десятков секунд до суток, где вариации МПЗ связаны с процессами в магнитосфере.

Изменения МПЗ во времени не могут не оказывать влияния на изменение окружающей среды. В настоящее время предложено множество физических механизмов таких взаимодействий — гипотез как в области солнечно-атмосферно-земных связей, так и в области корреляции геомагнитного поля с

глобальными изменениями окружающей среды (в первую очередь через климатические изменения). Однако несовершенна либо вовсе отсутствует база для оценки применимости этих гипотез путем статистического анализа данных. Последних к настоящему времени накоплено огромное количество, фактический материал зачастую неоднозначный и противоречивый, что в итоге приводит исследователей в тупик при попытках разобраться в причинно-следственных связях и механизмах гелиофеофизических процессов. Постановка такой задачи имеет непосредственное отношение к проблеме солнечно-земных связей и обусловлена необходимостью подтверждения либо отрицания гипотез, лежащих в основе природных процессов и их механизмов в рамках недавней эволюции земли как планеты.

Цель настоящей работы — на основе анализа нового фактического материала об пространственно-временной структуре геомагнитного поля проследить связь между вариациями геомагнитного поля и изменениями климата на разных временных масштабах.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Вначале кратко остановимся на проблеме долговременных изменений климата в масштабе сотен и тысяч лет. Здесь был выдвинут ряд гипотез и разработаны теории, которые в первую очередь старались объяснить причины возникновения оледенений. В частности, всеобщее признание получи-

ла астрономическая теория колебаний климата, известная как теория Миланковича. Она не опирается на изменение во времени солнечной постоянной, но предсказывает долговременные изменения количества солнечного излучения, попадающего на границу атмосферы, в связи с изменениями параметров орбиты Земли. В свете этой теории ледниковые эпохи и теплые интерглациалы в течение ледниковых периодов, отдельные ледниковые стадии и теплые межстадиалы в течение ледниковых эпох могут быть объяснены свойствами системы атмосфера — океан — лед и изменениями астрономических факторов [8, С. 274]. Однако даже активными сторонниками этой теории был поставлен ряд вопросов, которые до настоящего времени остаются открытыми, в частности: каковы причины кратковременных резких изменений климата и погоды? каковы причины возникновения малых ледниковых эпох? могут ли относительно небольшие изменения в сезонной инсоляции быть достаточными для объяснения резких изменений в развитии ледникового покрова? Другими словами, вопрос о причинах короткопериодных изменений климата продолжительностью сотни и первые тысячи лет не находит объяснения в рамках астрономической теории, хотя факты существования «малых ледниковых эпох», которые имели место по крайней мере на протяжении последних нескольких тысяч лет, неоспоримо доказаны. Примером тому является развитие так называемого «Малого ледникового периода» в XVII—XIX вв. Как другой пример можно привести резкий переход от ледникового периода к межледниковью на границе позднего плейстоцена — голоцене около 10 тысяч лет назад, когда изменение средней по Земле температуры на несколько градусов произошло всего за несколько сот лет. Хотя время перехода к межледниковью здесь совпало с фазой цикла Миланковича, для объяснения столь стремительного развития глобальных изменений климата, помимо относительно медленно изменяющихся астрономических параметров, должны быть привлечены дополнительные факторы. В частности, в работе [9] указано, что пониженные значения напряженности геомагнитного поля могут привести к глобальному похолоданию. При этом отмечается, что причинно-следственная связь между изменением магнитного поля Земли и климатом должна быть разной для разных характерных времен этих изменений. В настоящее время многими исследователями принята гипотеза, что вариации магнитного момента Земли с периодом порядка миллионов и сотен миллионов лет отражают перестройки конвекции в мантии, которая определяет перемещение литосферных плит, а

значит, резкое изменение географических координат различных частей суши. Естественно, что климат на этих территориях должен изменяться коренным образом. Рассматриваемая в настоящей работе закономерность имеет другие характерные времена — сотни и тысячи лет, и связана с изменением местоположения геомагнитного полюса во времени.

В серии работ [3, 14, 16] была предпринята попытка объяснить причины длительных и кратковременных изменений климата и погоды в связи с изменением корпускулярного излучения, сопровождаемого изменениями геомагнитной активности. В частности, был сделан вывод, что положение геомагнитного полюса (как центра аврорального овала) вместе с корпускулярным солнечным излучением (обуславливающим геомагнитную активность) существенно влияет на изменение атмосферной циркуляции в Европе. Если этот вывод принять как рабочую гипотезу, то изменение местоположения геомагнитного полюса в масштабе сотен — первых тысяч лет также должно быть отражено в долговременных изменениях климатической ситуации.

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ

Анализ новых данных об местоположении виртуальных геомагнитных полюсов (ВГП), которые были получены по результатам палеомагнитных исследований озерных отложений, наряду с данными об изменении палеотемператур за последние 13 тыс. лет, позволяет по-новому подойти к рассмотрению этой проблемы [1].

В основу выделения и подразделения позднеледникового голоцена на ландшафтно-климатические периоды и фазы многими исследователями положена модифицированная схема Блитта — Сернандера, хорошо отражающая характер основных природных изменений, по крайней мере в масштабах Северной Евразии. Эта схема неоднократно уточнялась и детализировалась, и к настоящему времени в каждом из этих периодов в свою очередь выделены фазы с достаточно точно установленными хронологическими рамками и климатическим содержанием. Подробная хронология и климатическая характеристика подразделений схемы дана в работах [10, 11]. Уточненный вариант схемы подразделений голоцена, отражающий характер сверхвековых ландшафтно-климатических изменений в центре Русской равнины, представлен на рис. 1. Здесь же приведена динамика ландшафтно-климатических условий в голоцене, рассчитанная мето-

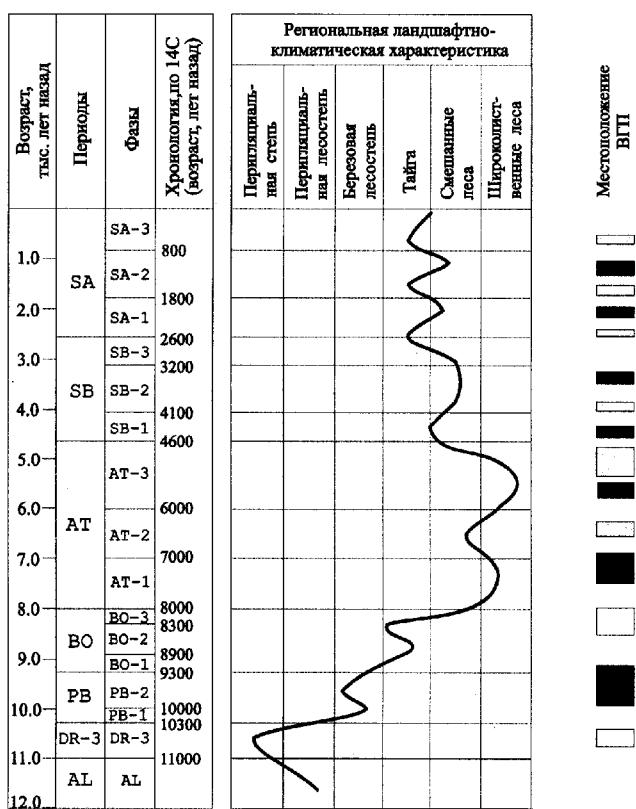


Рис. 1. Динамики ландшафтно-климатических условий в центре Русской равнины в позднеледниковые — голоцене. В правой части темными и светлыми прямоугольниками приведены периоды соответственно приближения и удаления ВГП относительно Европы

дом информационно-статистического анализа [5, 6], которая по существу отражает вариации палеотемператур.

В результате палеомагнитных исследований осадочных толщ на территории северной — северо-восточной Европы (Карелия, Кольский п-ов, Прибалтика и т. д.) были построены сводные кривые вариаций склонения и наклонения геомагнитного поля за последние 13 тыс. лет [1]. Этот материал представляет для анализа особую ценность, поскольку:

а) он получен для высокоширотной области, где наиболее контрастно выражены долговременные изменения природной среды и климата, а влияние недипольных источников геомагнитного поля минимально, что позволяет получить информацию о характерных особенностях изменения главного диполя;

б) доказана его достоверность, поскольку изменение геомагнитного поля во времени изучалось по

разным осадкам — озерным, озерно-ледниковым, ледниково-морским и морским;

в) он является высоконформативным и имеет хорошую возрастную привязку; шаг дискретизации не превышает первых десятков лет, а ориентировка образцов по магнитному склонению позволяет рассчитать координаты ВГП для большей части исследуемого временного интервала;

г) он снимает проблему корреляции палеоклиматических и палеомагнитных данных, поскольку фактический материал получен на одних и тех же объектах.

На рис. 2 представлена траектория дрейфа ВГП для разных эпох, цифры соответствуют определениям возраста (в тысячах лет). Здесь же более темными и более светлыми тонами схематически приведены эти же траектории дрейфа ВГП соответственно для холодных стадиальных и теплых ин терстадиальных периодов (обозначены буквами); при этом чем теплее период, тем светлее тон. Для анализа дрейфа ВГП в позднем голоцене были привлечены результаты надежных археомагнитных определений по ближайшей к исследуемому району территории Украины, которые охватывают последние 5500 лет [4].

Если проанализировать траекторию дрейфа ВГП относительно изменений природных условий в позднеледниковые — раннем голоцене, которые отражены в региональной кривой изменения ландшафтно-климатических характеристик (рис. 1), то очевидна следующая закономерность. Как следует из рис. 2, при приближении траектории дрейфа ВГП к северной Европе холодные стадиальные периоды (темные тона) сменяются теплыми ин терстадиальными (светлые тона), и наоборот, при удалении полюса с небольшой задержкой наступает похолодание. Так, в среднем (DR-2) и верхнем (DR-3) дриасе траектория дрейфа ВГП проходила существенно дальше от Европы, чем в ин терстадиале аллера (рис. 2, а). С началом пре бореала (PB, около 10.3 тыс. лет назад) — переломного периода перед последующим всеобщим потеплением климата — траектория дрейфа ВГП проходит наиболее близко к территории северной Европы (рис. 2, б). В это время геомагнитный полюс пересекал территорию Кольского полуострова на рубеже 9.7—9.5 тыс. л. н. [13]). За весь последующий период ВГП никогда более близко к территории Европы не приближался. Направленное потепление продолжалось на фоне чередования теплых и холодных периодов. Траектория дрейфа ВГП в раннем голоцене представлена на рис. 2, б. После половецкого потепления (на границе позднеледниковых — голоценов) полюс смещается к северо-западу по направлению Шпиц-

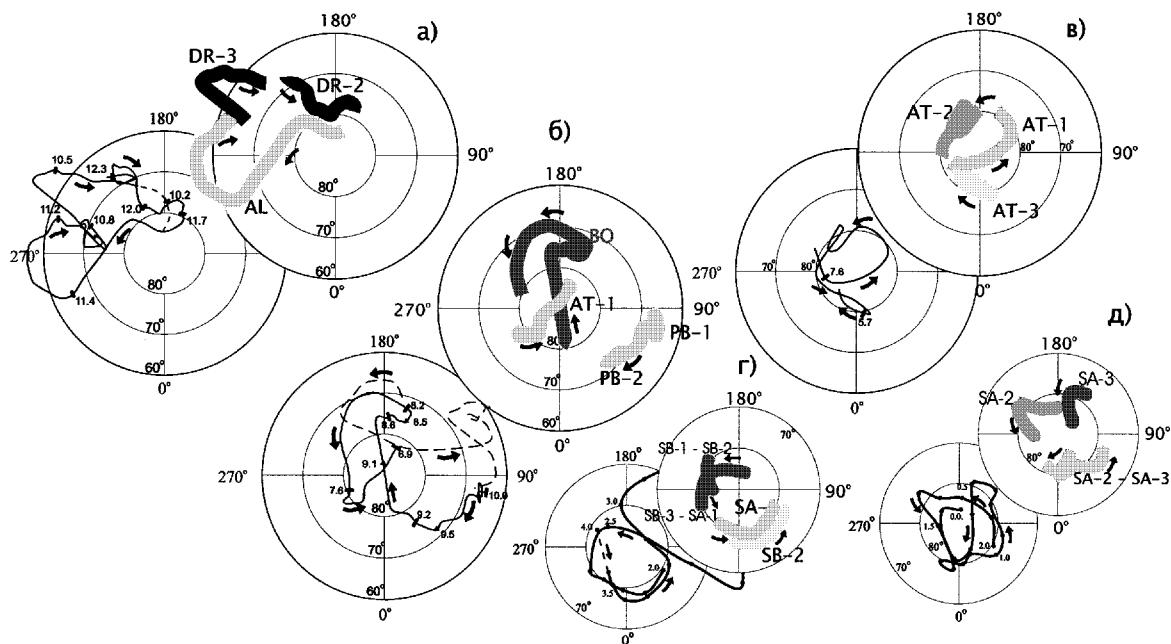


Рис. 2. Траектория дрейфа виртуальных геомагнитных полюсов (ВГП), рассчитанная для эпохи позднеледникового (а), раннего (б), среднего (в, г) и позднего (г, д) голоценов. Представлено в равнопромежуточной полярной проекции, 0° соответствует меридиану Гринвича. Цифры у кривых — возраст в тыс. лет. Стрелками указано направление дрейфа ВГП. Схематически дрейф ВГП представлен относительно холодных стадиальных (более темные) и теплых интерстадиальных (более светлые) периодов. Буквенные обозначения соответствуют периодам и фазам на рис. 1

берген — северный географический полюс — Чукотка — Аляска, а в северо-восточной Европе во второй половине РВ-2 наступает переславское похолодание. Позднее, до 7.6 тыс. л. н., в целом относительно прохладно с наиболее низкими температурами вблизи границы бореала — атлантика; этот экстремум (8.3 тыс. л. н.) фиксируется на палеотемпературных кривых (рис. 1). В это же время траектория дрейфа ВГП проходит на максимальном удалении от северной Европы. Последующему наступлению наиболее теплого периода голоцена — атлантика — соответствует местоположение полюса в районе северной Гренландии (около 7.5 тыс. л. н.).

Анализируя траекторию дрейфа ВГП в атлантике (рис. 2, в), можно сделать вывод о том, что полюс дважды приближался к Европе (при этом более поздняя по времени петля проходила вблизи северо-восточного побережья Гренландии) и один раз удалялся на долготу 180° — 240° . Атлантический период характеризуется двумя потеплениями (в АТ-1 и АТ-3, притом на последний приходится абсолютный температурный максимум голоцена) и более прохладным климатом в АТ-2. Соответственно траектория дрейфа ВГП (рис. 2, в) совпадает с периодом похолодания АТ-2 (удаление) и периода-

ми потепления АТ-1 и АТ-3 (приближение) с более близким расположением ВГП к Европейскому континенту в АТ-3. Аналогичную картину мы получим и при анализе траектории дрейфа ВГП в позднем голоцене.

Если теперь представить траекторию дрейфа ВГП относительно приближения либо удаления от Европейского континента (рис. 1), то определенная выше закономерность наиболее очевидна. Таким образом, местоположение геомагнитного полюса как центра аурорального овала через механизмы, изложенные в работах [1, 3, 14—16], может иметь определяющее значение для долговременных (100—1000 лет) климатических изменений в центральной и северной Европе, по крайней мере для последних 13 тыс. лет.

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ

Если теперь перейти к рассмотрению процессов в масштабе нескольких дней — нескольких недель, то в первую очередь следует рассмотреть механизм влияния корпускулярного потока на метеорологические процессы. Одним из аргументов против

возможности влияния солнечной активности на атмосферную циркуляцию и связанную с ней погоду является указание на то, что лучистая энергия Солнца во много раз превышает энергию его ультрафиолетового и рентгеновского излучения, солнечного ветра, солнечных корпускулярных потоков магнитного поля Солнца. Общий поток энергии, достигающий магнитосфера, составляет $8.9 \cdot 10^{16}$ Вт. Полная энергия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), попадающих на верхнюю границу атмосферы в единицу времени с учетом того, что из-за экранирующего действия геомагнитного поля на Землю проникает менее 1 % энергии, оценивается как [17]

$$P_c = [\pi r_m^2 (0.5\delta V_s^2 + B^2/2\mu_0) V_s]/100 = 5 \cdot 10^{10} \text{ Вт},$$

где r_m — радиус магнитосферы Земли, δ — плотность солнечного ветра, B — напряженность ММП, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Эта величина составляет менее одной миллионной доли в потоке солнечной энергии, достигающей Земли, что совершенно недостаточно для возмущения или преобразования атмосферной циркуляции после проникновения доли энергии в стратосферу или тропосферу. Однако с учетом влияния некоторых дополнительных факторов оказывается, что поток корпускулярного излучения может сыграть роль спускового механизма, который активизирует процессы в атмосфере. Этот спусковой механизм можно представить следующим образом.

Среднее годовое количество лучистой энергии, падающей на приполюсные области, равно только 0.4 такого же значения для экватора. Кроме того, на ночную сторону Земли, а также зимой на дневную сторону в области полярных шапок, где заряженные частицы могут легче всего проникать в верхнюю и среднюю атмосферу полярных широт через магнитосферный хвост, лучистая энергия не поступает. Здесь доля корпускулярной и магнитной энергии велика, особенно если учесть что она поступает в атмосферу через довольно узкую околосолнечную широтную зону вблизи зоны полярных сияний (авроральный овал). Принимая ширину этого пояса, центрированного на широту 65° , равной 10° , его площадь на освещенной Солнцем стороне Земли будет равна $9.35 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Именно на эту площадь следует умножить солнечную постоянную в формуле (1), а также на коэффициент 0.42 учитывая наклонное падение потока излучения. Принимая во внимание, что зимой снежный и облачный покров может увеличить альбедо Земли до 0.9, получаем, что при зенитном Солнце поток лучистой энергии для этой части земной поверхности в единицу времени составляет $5 \cdot 10^{14}$ Вт.

Во время интенсивной геомагнитной бури энергия, запасенная в хвосте магнитосферы и составляющая около 10^{18} Дж, переходит в верхние слои атмосферы примерно за 10^4 с, т. е. в верхней атмосфере в довольно узком поясе диссирируется мощность около 10^{14} Вт. Кроме того, наочной стороне энергия солнечного ветра будет единственным внешним источником энергии. Этого вполне достаточно, чтобы поток сыграл роль спускового механизма, в частности для зимнего периода. Энергия типичного циклона составляет $5.3 \cdot 10^{17}$ Дж при угловой скорости $6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, что сравнимо с энергией магнитной бури. Таким образом, если поток энергии эффективно направлен, магнитосфера обладает ресурсами, которые, вероятно, могут влиять на образование вихрей в нижней атмосфере. Один из таких механизмов влияния корпускулярного потока на метеорологические процессы рассмотрен в цикле работ [3, 14, 16].

Общая циркуляция атмосферы в значительной степени контролируется центрами действия атмосферы — обширными квазистационарными областями высокого и низкого давления, распределенными вокруг Земли. Известно два основных типа атмосферной циркуляции: зональный и меридиональный. В северном полушарии, где площади, занятые океанами и континентами, сопоставимы, а контраст температур суши — океана значителен, есть благоприятные условия для меридионального типа циркуляции. Здесь в средних широтах в течение сезона неоднократно наблюдается смена типов циркуляции.

Изменение общей атмосферной циркуляции зависит не только от интенсивности и динамики центров действия атмосферы, но, в соответствии с вышеизложенным, вероятно связано с процессами в авроральном овале в периоды возрастания корпускулярного излучения (и связанной с ним геомагнитной активности). Связь между последней и воздушными течениями можно проследить, анализируя синоптическую ситуацию при разной геомагнитной активности.

Было установлено, что геомагнитная активность, характеризуемая *Кр-индексом*, коррелирует с динамикой планетарных высотных фронтальных зон. Этот результат был получен при анализе поля приземного давления и его поля геопотенциала на уровне 500 мбар для геомагнитной активности внутри каждого месяца года за период 1964—1999 гг. [2, 7].

На рис. 3 вверху приведен эталон барических полей у поверхности земли (рис. 3, а) и на среднем уровне тропосферы (500 мбар) (рис. 3, б) в период повышенной (вверху) и пониженной (внизу) геомагнитной активности. Очевидно, что меридио-

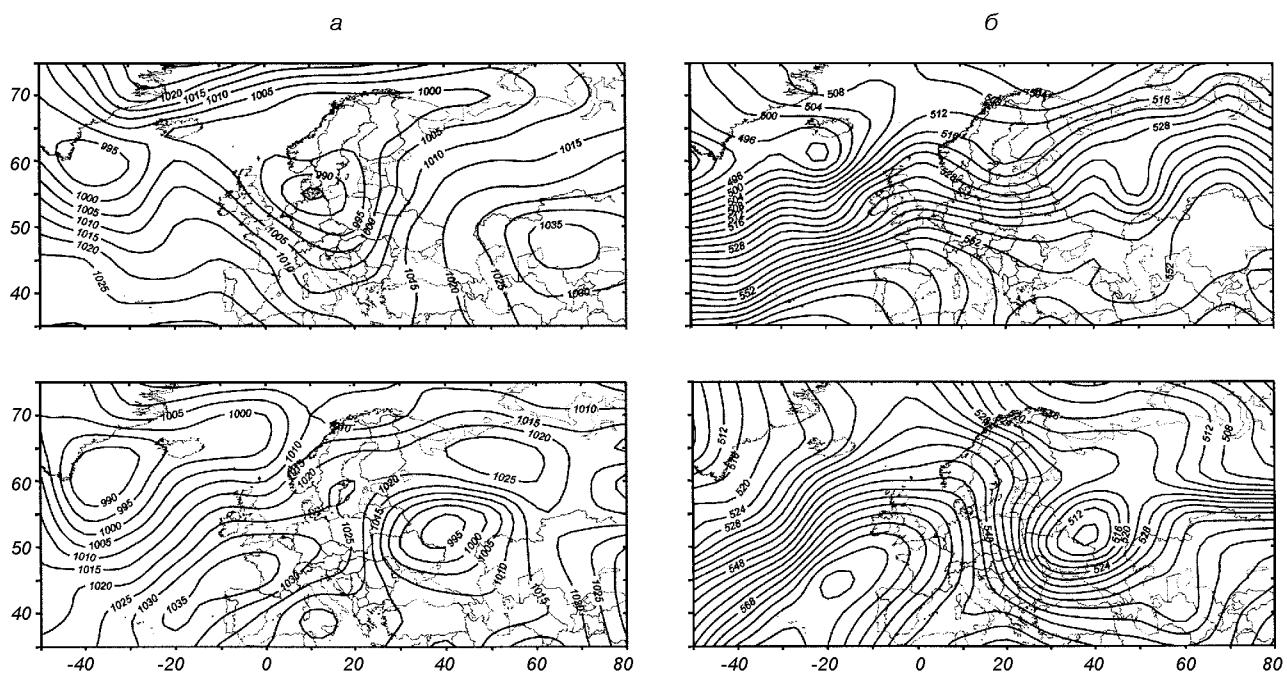


Рис. 3. Эталон барических полей у земли (а) и на среднем уровне тропосферы (500 мбар) (б) в период повышенной (вверху) и пониженной (внизу) геомагнитной активности

нальность атмосферной циркуляции с неблагоприятными погодными условиями усиливается в годы низкой геомагнитной активности. При высокой геомагнитной активности отмечаются более устойчивые барические образования и связанные с ними погодные условия, определяющие широтным положением высотно-фронтальной зоны на среднем уровне тропосферы. Атмосферные процессы преобразуются в сторону усиления циклоничности после максимумов геомагнитного индекса и в сторону усиления антициклоничности после его минимумов.

Этот вывод согласуется с ранее полученными результатами [12, 15], согласно которым в северном полушарии зимой практически после каждой сильной магнитной бури следует повышение температуры в области аврорального овала. Результатом внезапного значительного возрастания температуры на станциях, расположенных вдоль области аврорального овала, является повышение атмосферного давления вокруг внешней части аврорального овала. Возрастание температуры и давления фиксируются не только на высотах нескольких сотен километров, как показывают спутниковые данные, но и в стратосфере и тропосфере, а также на уровне моря. Такое возрастание температуры наблюдается в основном в зимнее время, в то время как летом интенсивность этого процесса на порядок

меньше, что следует из соотношения общего потока солнечной энергии в северном полушарии зимой ($6.0 \cdot 10^{15}$ Вт) и летом ($8.9 \cdot 10^{16}$ Вт). Результатом внезапного значительного возрастания температуры на станциях, расположенных вдоль области аврорального овала (см. рис. 1 работы [15]), является повышение атмосферного давления вокруг внешней части аврорального овала. Так, на уровне 500 мбар вдоль наружной части аврорального овала возрастание температуры на $2-10^{\circ}\text{C}$ и давления на 10–20 мбар следует сразу после усиления геомагнитной активности. При этом в ближайшие несколько дней циклогенез усиливается у поверхности земли, высотно-фронтальная зона опускается к югу, усиливая циклоническую деятельность над северным полушарием.

Если рассматривать развитие этого процесса относительно квазистационарных областей высокого и низкого давления, то во время низкой геомагнитной активности, когда имеет место меридиональная циркуляция, по восточной периферии высотной ложбине низкого давления происходит адvection теплого воздуха, который ведущим потоком поднимается в северные широты, в то время как холодный воздух по западной периферии этой ложбине опускается в более южные широты. С другой стороны, при возрастании геомагнитной активности наблюдается уменьшение меридионального гради-

ента (экватор — полюс), что приводит к зональной циркуляции атмосферных процессов в тропосфере. Таким образом, геомагнитная активность связана с глобальным характером атмосферных процессов, так как изменение одного типа циркуляции на другой имеет место во всем северном полушарии одновременно.

ВЫВОДЫ

Анализ траектории дрейфа ВГП относительно стадиальных — интерстадиальных периодов в эпоху позднеледниковых — голоцен очевидно свидетельствует о связи чередования холодных и теплых периодов в северной и центральной — восточной части европейского континента с местоположением геомагнитного полюса. А процессы в авроральном овале, обусловленные геомагнитной активностью, оказывают существенное влияние на атмосферную циркуляцию. Из этого следует, что местоположение геомагнитного полюса (как центра аврорального овала) может оказывать влияние на характер атмосферной циркуляции, и следовательно, на динамику долговременных климатических изменений в Европе. И если причиной долговременных климатических изменений в масштабе десятков — сотен тысяч лет являются астрономические факторы (изменение параметров орбиты Земли), то колебания климата в масштабе нескольких сотен — первых тысяч лет каким-то образом связаны с пространственно-временной структурой МПЗ.

Конечно, нет оснований предполагать, что колебания климата обусловлены вариациями геомагнитного поля, однако корреляция прослеживается. Вероятно, и те и другие являются следствием какого-либо третьего (внеземного) фактора. Тем не менее, выявленная закономерность подтверждается достаточно надежным фактическим материалом и, по мнению автора, может быть принята в качестве рабочей гипотезы с последующим ее развитием и всесторонним анализом как в области исследования солнечно-земных связей, так и в рамках накопления нового фактического материала по палеоклиматическим реконструкциям и вековым вариациям магнитного поля Земли.

1. Бахмутов В. Г. Связь вариации геомагнитного поля с палеоклиматическими изменениями в центральной и северной Европе за последние 12500 лет // Геофиз. журнал.—1999.—21, № 4.—С. 40—58.
2. Бахмутов В. Г., Мартазинова В. Ф., Чулков И. С. Влияние возмущенности геомагнитного поля на процессы атмосферной циркуляции в северном полушарии // Гидрометеорологические исследования в Украине: Тр. УкрНИГМИ. — Киев: УкрНИГМИ, 2000.—Вып. 248.—С. 22—35.

3. Буха В. Причины оледенений и быстрых изменений климата и погоды // Четвертичные оледенения Западной Сибири и других областей северного полушария. — Новосибирск: Наука, 1981.—С. 14—24.
4. Загний Г. Ф., Русаков О. М. Археовековые вариации геомагнитного поля Юго-Запада СССР. — Киев: Наук. думка, 1982.—128 с.
5. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 млн. лет (кайнозой: от палеоцена до голоцен) / Под ред. А. А. Величко). — М.: ГЕОС, 1999.—260 с.
6. Климанов В. А. К методике восстановления количественных характеристик климата прошлого // Вестник МГУ. Сер. 5. География.—1976.—№ 2.—С. 92—98.
7. Мартазинова В. Ф., Бахмутов В. Г., Чулков И. С. Геомагнитная активность и атмосферная циркуляция // Геофиз. журнал.—2004.—26, № 1.—С. 96—108.
8. Монин А. С., Шишков Ю. А. История климата. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979.—408 с.
9. Петрова Г. Н., Распопов О. М. Связь изменений магнитного момента Земли и палеоклимата за последние 12 тысяч лет // Геомагнетизм и аэрономия.—1998.—38, № 5.—С. 141—150.
10. Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. — М.: Наука, 1977.—159 с.
11. Хотинский Н. А. Дискуссионные проблемы реконструкции и корреляции палеоклиматов голоцена // Сб. Палеоклиматы позднеледниковых и голоценов. — М.: Наука, 1989.—С. 12—17.
12. Чернопруд В. Е., Мулюкова Н. Б., Мустель Э. Р. О возрастании неустойчивости зимней тропосферы в умеренных широтах северного и южного полушарий Земли после вхождения ее в солнечные корпускулярные потоки // Тр. ГМЦ СССР.—1991.—Вып. 316.—С. 106—109.
13. Bakmutov V., Yevzerov V., Kolka V. Geomagnetic secular variations of high-latitude glaciomarine sediments: data from Kola Peninsula, northwestern Russia // Phys. Earth and Planet Inter.—1994.—85.—P. 143—153.
14. Bucha V. Direct relations between solar activity and atmospheric circulation, its effect on changes of weather and climate // Studia geoph. et geod.—1983.—27.—P. 19—45.
15. Bucha V. Influence of corpuscular radiation on changes in the middle atmosphere and troposphere // Adv. Space Res.—1988.—8, N 2.—P. (7)205—(7)210.
16. Bucha V., Bucha V. Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation // J. Atm. and Solar-Terr. Phys.—1998.—60, N 2.—P. 145—169.
17. Dessler A. J. Some problems in coupling solar activity to meteorological phenomena // Symp. Possible relations between Solar Activity and Meteorological Phenomena, Nov. 1973, Aeronautics and Space Admin.—1974.—P. 299—318.

THE CONNECTION BETWEEN GEOMAGNETIC SECULAR VARIATIONS AND ATMOSPHERIC CIRCULATION AND CLIMATE CHANGES IN EUROPE

V. Bakmutov

On the basis of new palaeomagnetic data from the NE Europe, the drift of virtual geomagnetic pole throughout the past 13 kyr is calculated. An analysis of the data with respect to palaeotemperature and palaeoclimate phases in N-NE Europe is carried out. The alternation of cold and warm stages as a function of approaching (receding) the virtual geomagnetic pole to Europe is established. The relationship between geomagnetic field disturbances caused by solar activity and atmospheric circulation is confirmed. We conclude that the position of the geomagnetic pole and corpuscular solar radiation have a significant effect on atmospheric circulation in the north hemisphere.

© Л. Н. Яременко, Т. А. Мозговая

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

СОПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНЫХ СУББУРЬ В СРЕДНИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ

При первых спробах виделення спрятежених точок суббур у північній та південній півкулі виявилось, що для суббур це не точка, а область, видовжена по довготі. Ця область не збігається зі спрятеженими точками, які були визначені по свистах. За даними обсерваторій у південній частині Індійського океану PAF, CZT та AMS для кожної суббурі вибиралися області по багатьох європейських обсерваторіях, розташованих на тому ж магнітному меридіані. Для PAF у магнітно-спокійний час спрятежена область визначається поблизу NUR або трохи північніше, іноді простягаючись до LOV і BFE. При магнітних бурях, коли PAF потрапляє під вплив південного полярного струменя або знаходиться південніше її центральної лінії, спрятежена з PAF область на півночі знаходиться поблизу TRO, північніше SOD. Зсув по L-оболонках — 4 одиниці. Спрятежена область з AMS при слабо збуреному полі може знаходитись поблизу BEL, NGK, WNG, у спокійний час — поблизу KIV або східніше. Спрятежена область з CZT знаходиться поблизу BDV, NCK, FUR, а при дуже спокійних умовах її можна тільки передбачати в Греції або Туреччині. В цьому випадку струм суббурі дуже повільно слабшає з широтою, його інтенсивність в NCK і TAM відрізняється на 20–30 %. В Америці спрятежена область зі станцією Академік Вернадський знаходиться між FRD та OTT, зсуваючись по широті залежно від магнітної активності. В Австралійсько-Далекосхідному регіоні спрятежена область з КАК знаходиться поблизу ASP і CTA, а з MMB — в районі CNB. Далекосхідний регіон відрізняється нестабільністю. Інтенсивність суббурі в Австралії та Японії може змінюватись більш ніж вдвое за короткий час.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные суббури возникают одновременно по всей Земле, но их амплитуды сильно разнятся в зависимости от местного солнечного времени, величины постоянного магнитного поля Земли, место- положения обсерватории и других факторов. Исследование сопряженности магнитных суббурь, одновременно регистрируемых в северном и южном полушариях, интересно тем, что оно показывает различия в солнечном влиянии на разные полушария, как солнечного корпускулярного излучения, так и излучаемых Солнцем магнитных облаков. Естественно, что наиболее четко проявляется влияние вертикальной составляющей B_z ММП. Но видны изменения и за счет других составляющих, а также за счет кратковременных колебаний интенсивности и плотности корпускулярных потоков. Кроме того, на протекание магнитных суббурь оказывает влияние строение Земли.

Выбор сопряженных точек в северном полушарии для магнитных суббурь, наблюдавшихся в Антарктике на станции Академик Вернадский (AIA), показал, что это некоторая область, расположенная между обсерваториями FRD и OTT, перемещающаяся к северу или югу в зависимости от магнитной

активности. Ранее по англо-американским наблюдениям свистов обсерватория STJ была определена как сопряженная с AIA. Но характер суббурь в STJ существенно отличается от наблюдавшихся в AIA и изредка бывает близок к записям обсерваторий в Англии.

Так как в AIA и Америке геомагнитный и географический меридианы параллельны, и влияние каждого из них трудно выделить, работа была продолжена по наблюдениям в южной части Индийского океана и в Европе при резкой разнице прохождения указанных меридианов, а также в Дальневосточном регионе. Учитывалась интенсивность суббурь, направление вектора тока, характер записи. Соответственно европейскому континенту приблизительно на тех же геомагнитных долготах расположены три обсерватории: PAF ($\Lambda = 132^\circ$), CZT ($\Lambda = 111^\circ$), AMS ($\Lambda = 143^\circ$). В Европе геомагнитный меридиан 120° проходит через SOD. Между 110° и 120° находятся ABK, TRO, NUR, KIV. Для AMS сопряженную точку по геомагнитной долготе можно предполагать где-то на Урале.

Дальневосточный регион по количеству обсерваторий лучше представлен в южном полушарии. Южная полярная струя большей частью проходит через MCQ и PAF, окружая полярную шапку с

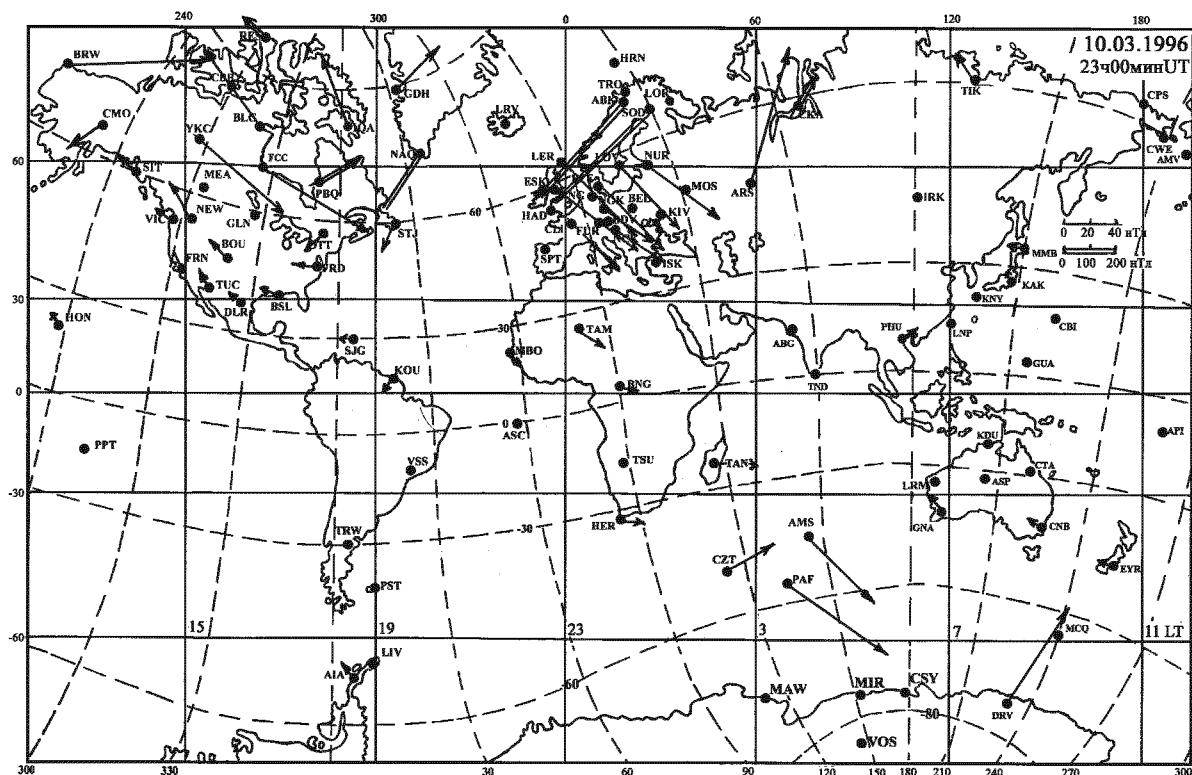


Рис. 1. Векторы тока магнитной суббури 10.03.1996 г. (23 ч 00 мин UT)

магнитным полюсом, находящимся несколько севернее DRV. Геомагнитные меридианы на долготах GNA — PHU параллельны географическим. В более восточной части в северном и южном полушариях вблизи $\Lambda = 250^\circ$ в. д. расположены обсерватории CMO и EYR, на которых нередко наблюдаются очень похожие записи суббури.

ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ СУББУРЬ

Суббури 10.03.1996 г. в 23—24 ч UT четко проявилась на всех европейских обсерваториях, в PAF она имела амплитуду $H = 82$ нТл и вектор тока, направленный на юго-восток (рис. 1). В PAF это предутренняя суббурия (5 ч LT), а в Европе в это время полночь. Видно, что ток из полярной струи в ABK и SOD, направленный на юго-запад в средние широты, поворачивает на юго-восток. Возврат его в полярные широты можно предположить в западной Азии. В южном полушарии в PAF мы видим возврат тока в полярные широты. Центр вихря в южном полушарии очевидно находился существенно западнее. Это связано с тем, что на возникновение и протекание магнитных суббури

влияют и геомагнитные, и географические координаты, то есть постоянное магнитное поле Земли и местное солнечное время. Сравнивая запись в PAF рассматриваемой суббури с данными в Европе, видно, что наиболее подобной является запись в NUR. По величине вектора это должна быть точка чуть севернее NUR по направлению к SOD, но не намного, так как в SOD сильный ток направлен на юго-запад. Следует отметить, что по магнитным суббуриям нельзя определить сопряженную точку, это всегда сопряженная область, довольно узкая по широте, но сильно вытянутая по долготе. Насколько сопряженная область данной суббури вытянута в восточном направлении, сказать трудно, так как нет обсерваторий. Возможно, эта область совпадает с Сограй, где по свистам определена сопряженная точка с PAF. Относительно записи суббури 10.03.1996 г. в 23—24 ч UT в AMS можно сказать, что сопряженная область располагается южнее NUR, проходит через LOV и BFE, но насколько она протягивается на восток — пока неясно. Данные по CZT представляют собой вектор на северо-восток-восток, то есть это ток еще до поворота на юго-восток, к тому же сильно ослабленный. Возможно, весь вихрь магнитной суббури в южном полушарии

был слабее, чем в северном. При сравнении CZT с самой южной в Европе обсерваторией NCK и ТАМ в Африке видно, что вектор в CZT меньше, чем NCK, и более восточного направления. Такого же направления вектор в ТАМ, но еще меньше. Сопряженная с CZT область должна бы была располагаться в Италии или в Греции.

Другая суббурая 12.03.1996 г. в 18—20 ч UT с максимумом в 19 ч 15 мин хорошо видна почти по всему миру. На станции Академик Вернадский это послеполуденная суббурая с амплитудой $H = 25$ нТл. В сопряженной области в Северной Америке она имеет меньшую амплитуду (в ОТТ 18 нТл), что связано с дневным временем. В виде небольшой, но четкой суббури она видна в BSL, DLR, TUC, KOU, HON, PPT, но на севере Америки в PBQ, BCL ее почти нет. Суббурая становится видна восточнее, начиная с GDH. В Европе в вечернее время в SOD и ABK это интенсивная длительная суббурая с амплитудами больше 200 нТл и векторами тока, направленными в полярную шапку. Начиная с NUR и южнее до экватора видно, как постепенно уменьшается амплитуда суббури и сглаживаются мелкие колебания, ток становится более плавным. Амплитуды у экватора снижаются до 5—6 нТл. Но резкий прогиб в 19 ч виден и в северном, и в южном полушариях (рис. 2). Векторы тока в Европе направлены на юго-восток, замыкание тока можно предполагать в Азии. В южном полушарии центр вихря очевидно располагался южнее Африки. На островах Индийского океана виден ток, возвращающийся в полярную шапку. Можно предполагать, что центры вихрей в северном и южном полушариях располагались на одной географической долготе. Сопряженная область с PAF на севере проходит южнее NUR, через LOV, BFE, WNG. Вектор в AMS меньше, чем в CZT. Очевидно, AMS находился на краю вихря тока. Сопряженная с AMS область в Европе не видна, ее только можно предполагать где-то в восточной части Средиземного моря или в Ираке. В CZT ток был более интенсивным, так как эта обсерватория находилась ближе к центру вихря. Но сопряженная область в Европе все же не видна. Она должна находиться южнее обсерватории NCK, скорее всего в Греции или Турции.

Суббурая 19.03.1996 г. в 17—19 ч UT характеризуется изменениями максимума D - и Z -составляющих. Если максимум H на всех трех обсерваториях Индийского океана наблюдался в 17 ч 50 мин — 18 ч 00 мин UT, то величины D и Z предварительно прошли соответственно через минимум и максимум в 17 ч 30 мин UT в PAF, в 17 ч 45 мин UT в CZT, в AMS минимум был незначительным и

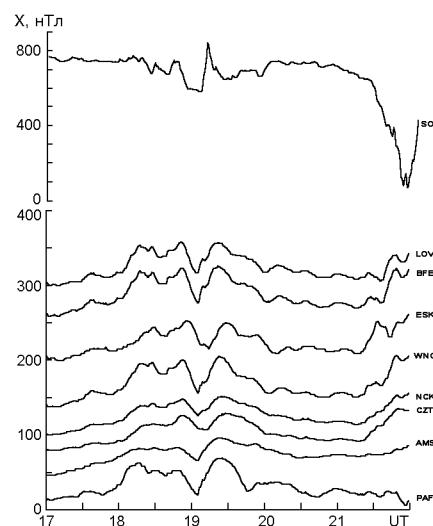


Рис. 2. Запись магнитной суббури 12.03.1996 г. (17—21 ч UT)

растянулся в D с 16 ч 50 мин до 17 ч 20 мин UT, а в Z — с 17 ч 00 мин до 18 ч 00 мин UT. Это показывает, как во время суббури изменяются и интенсивность, и направление тока. Наиболее четко это проявилось в PAF, где ток из северо-восточного стал юго-восточным. На более западной обсерватории CZT ток тек на северо-восток, а восточнее в AMS он повернул на юго-восток. В Европе поворот среднеширотного тока не зафиксирован. Судя по наблюдениям, он должен был происходить где-то в Азии. В Европе видно только вытекание тока из полярной струи в SOD и ABK на юго-запад в средние широты, где на всех обсерваториях ток тек на юго-восток. В случае этой суббури при одном и том же геомагнитном меридиане мы вновь имеем разные части северного и южного токовых вихрей. Сопряженная область с PAF должна располагаться южнее NUR, скорее всего между SOD и NUR. Сопряженная область с AMS — в районе BEL, NGK. Сопряженная область с CZT — в районе FUR, BDV.

Суббурая 14.04.1996 в 20 ч UT прекрасно видна в северной полярной шапке в ALE с амплитудой $H = -246$ нТл, но максимум ее был в 19 ч 15 мин UT. В MBC видно ее смещение по времени: максимум H в 18 ч 40 мин UT, максимум Y в 19 ч 10 мин UT, максимум Z в 19 ч 30 мин UT. В RES смещение происходило с 18 ч 30 мин до 19 ч UT. В зоне северной полярной струи в СМО, SIT этой суббури не было. В Японии и CNB суббурая хорошо видна. В южной полярной шапке она четко выделяется, но с небольшими амплитудами: +86 нТл в DRV и -70 нТл в SBA. В Индийском океане эта суббурая лучше всего видна в CZT, но максимум

был в 20 ч 15 мин UT, а токи на трех обсерваториях имели разное направление. В CZT ток был направлен почти на север, в PAF — на северо-восток, а в AMS повернулся на юго-восток. В Европе в Скандинавии (полярная струя) и в Англии токи были направлены на юго-запад, а от NUR и LOV до NCK — на юго-юго-восток. Поворот тока, наблюдавшийся в AMS и PAF, в северном полушарии не виден. Очевидно его следовало бы искать в западной Азии. Сопряженная область с CZT в Европе располагается в районе FUR, BDV, сопряженная с PAF — южнее NUR, близко к LOV, но севернее BEL, WNG, BFE. Сопряженная область с AMS в данном случае не видна, предположительно она может находиться в районе Турции. Протяженность любой из областей в восточном направлении не известна.

В этот же день 14.04.1996 г. произошла еще одна очень интенсивная суббурая в 22—24 ч UT с двумя максимумами в 22 ч 40 мин и в 23 ч 20 мин UT. В ABK в зоне струи виден первый пик еще раньше в 21 ч 50 мин UT. Амплитуды в ABK 600—700 нТл. До широты BEL они снизились до 100 нТл. В LER, ESK, HAD эти пики очень небольшие, но резко увеличился провал в 23 ч UT, так что суббурая стала отрицательной (рис. 3). Видно, как суббурая в Англии резко отличается от среднеевропейской. Сопряженная область с PAF находится в районе NUR, LOV, WNG, BFE, сопряженная с AMS — южнее BDV и существенно восточнее. Южнее европейских обсерваторий должна находиться область, сопряженная с CZT. Приблизительно аналогичными по зеркальному отображению и величине являются векторы в CZT и CLF.

Суббурая 10.09.1996 г. с максимумом в 2.50 UT хорошо видна в Европе, Америке и по всему миру, так как день был довольно возмущенным.

Между CZT и более восточными AMC и PAF видна смена направлений векторов тока. В северной Европе в ABK и SOD хорошо видно запрещенное дневное время, когда в полярных широтах суббури возникать не могут (рис. 4). Таких обсерваторий, как NUR и более южных, это не касается. В AIA это очень четкая суббурая с амплитудой $H = 134$ нТл, в ABK — 640 нТл, NUR — 70 нТл, у экватора в MBO, BNG 20—30 нТл. Область, сопряженная с PAF, находится немного севернее NUR, LOV, LER. Сопряженная с AMS область располагается южнее BEL, FUR, но севернее BDV, ближе к KIV. Во время большинства суббурь векторы тока в HER имеют незначительные величины, намного меньше, чем в CZT. В данном случае векторы в CZT и HER близки по величине и направлению. Сопряженную область с CZT можно предполагать в

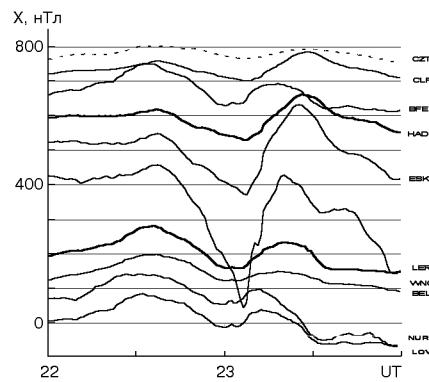


Рис. 3. Запись магнитной суббури 14.04.1996 г. в 22—24 ч UT

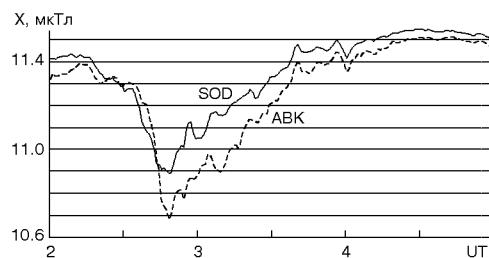


Рис. 4. Записи магнитных суббурь 10.09.1996 г. на полярных станциях с выделением запрещенного времени после 4.10 ч UT

районе BFE. На величину суббури влияет (кроме общей интенсивности и солнечного времени) положение относительно центра вихря, что в данном случае и отобразилось.

Суббурая 11.09.1996 г. в 14 ч UT произошла на фоне непрерывных мелких суббурь. Судя по векторам в CNB и GNA, направленным на северо-запад, и векторам в PAF, AMS и CZT на юго-запад, можно считать, что центр вихря находился южнее GNA, и векторы в Индийском океане соответствуют возвратному току в южные полярные широты. Векторы в Европе также принадлежат возвратному току в полярную струю. В данном случае хорошо видно уменьшение длины векторов при движении с севера к югу в Европе. Сопряженная область с PAF находится в районе NUR. В сторону LOV видно уменьшение вектора. К тому же в PAF вектор тока более круто направлен на юг. Севернее NUR в SOD виден ток полярной струи, направленный на северо-восток. Значит, чуть севернее NUR ток должен стать более северным и будет соответствовать току в PAF (рис. 5). Зеркальным отображением почти одинаковых векторов в CZT и AMS могут быть векторы в полосе KIV, NGK, WNG, ESK. Это случай, когда возвратные токи в северном и южном

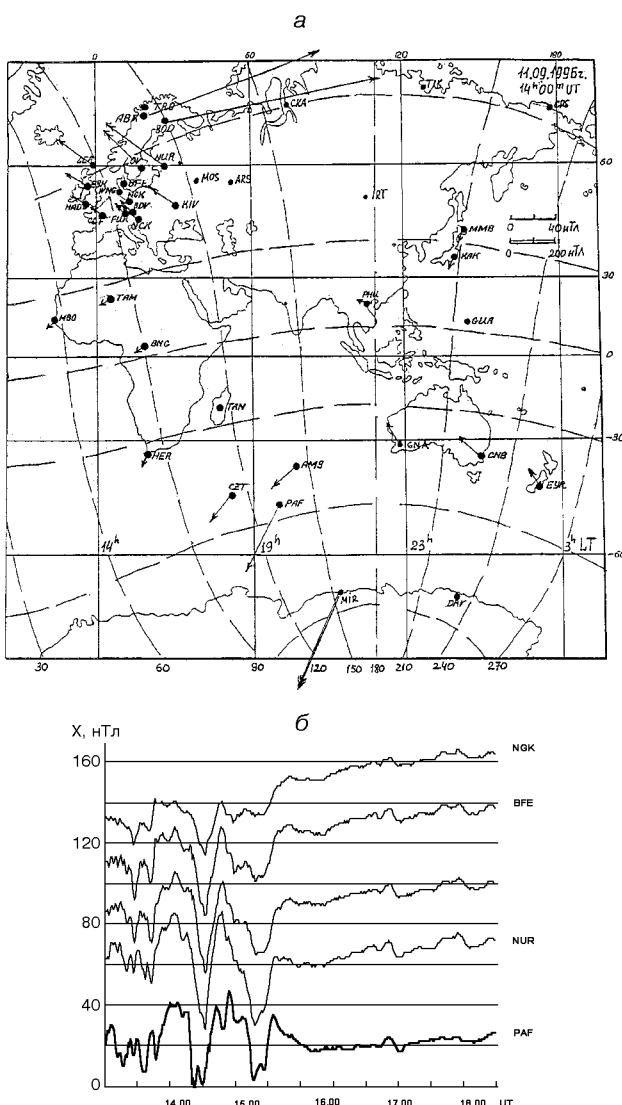


Рис. 5. а — векторы тока магнитной суббури 11.09.1996 г. (14 ч 00 мин UT); б — запись суббури 11.09.1996 г. в 13—18 ч UT

полушариях сдвинуты по долготе сильнее, чем смещение геомагнитных меридианов.

Во время суббури 11.09.1996 г. в 21 ч UT видно вытекание тока из полярной шапки на юго-восток с разделением векторов в Европе приблизительно по меридиану 5° в. д. Более западные станции во Франции и Англии показывают течение тока на юго-юго-запад. Над остальными европейскими обсерваториями ток тек на юго-юго-восток. Центр вихря можно предполагать над Азией. В южном полушарии вихрь виден лучше. После северо-северо-восточного направления в PAF и CZT ток становится северо-восток-восточным в AMS и юго-юго-

восточным в GNA. Сопряженную с PAF область на севере можно видеть в NUR и LOV. Току в CZT может соответствовать по направлению и величине ток в NGK и BDV. В KIV видно, как ток становится более восточным, т.е. восточнее и южнее KIV более ослабленный ток может соответствовать току в AMS.

23.09.1996 г. в 04—05 ч UT в Европе и Америке видна очень четкая суббура, а на островах Индийского океана ее почти нет. Возможно, это произошло за счет предутреннего времени в Европе и дневного в Индийском океане. Разделение направлений токов хорошо видно во время суббури 23.09.1996 г. в 15—16 ч UT. В Европе ток на линии LER — FUR и на всех более восточных обсерваториях, включая полярные ABK и SOD, был направлен на юго-восток, с поворотом на восток в PHU и на северо-восток в KAK и MMB, т.е. вихрь занимал почти всю Европу и всю Азию. Более западные обсерватории ESK, HAD и CLF, включая африканские TAM и BNG, а также все американские обсерватории показали направление тока на юго-запад, теряя интенсивность при движении к экватору. В южном полушарии самый интенсивный ток виден в PAF, сопряженный с NUR. В AMS ток стал существенно слабее и соответствовал току в KIV, BDV. В CZT ток имел северо-западное направление несмотря на то, что в HER и TAN слабеющий ток был северо-восточного направления. Для CZT сопряженную область можно определить в HAD, CLF. В начале суббури в CZT и PAF ток был направлен на северо-запад, но быстро изменил направление на северо-восточное. В AMS предварительный отрицательный пик исчез, и суббура полностью соответствовала северо-восточному току.

Суббура в 17—18 ч UT 23.09.1996 г. была более интенсивной в северном полушарии. Векторы тока в Европе и на севере Америки были направлены на юго-восток при западной полярной струе в SOD, ABK, GDH. В южном полушарии виден поворот тока от северо-восточного направления в CZT к юго-восточному в AMS и PAF. Сопряженная область с PAF находится в районе BEL, NGK, для CZT — это ODE и более восточные области. Для AMS сопряженная область по этой суббуре не видна. Предположительно она могла бы располагаться в Малой Азии. В GUA и Японии еще ночь, но этой суббури нет. Данная суббура не захватила все ночное время, а только его часть.

Во время бури 06-07.04.2000 г. в северном и южном полушариях были сопоставлены несколько суббури. Ток суббури в 2 ч 30 мин UT 07.04.2000 г. был направлен в обоих полушариях на юго-восток-восток с резким увеличением его интенсивности в

MCQ и CSY, т.е. в зоне южной полярной струи. На севере Дальневосточного региона обсерватории расположены в основном на островах или в прибрежных районах и это отображается на интенсивности токов суббури. На Дальнем Востоке нет таких, как в Европе, постепенно уменьшающихся к югу векторов, преобладает их разброс. В Китае и Вьетнаме (BMT, PHU) они более интенсивны, чем в Японии и на Гуаме. На побережье Австралии векторы меньше, чем в центре материка (на ASP). Самой северной обсерватории ММВ во время этой суббури может соответствовать ток в СТА, несмотря на то, что ММВ расположена по геомагнитной широте на 5° севернее. В южном полушарии описываемого региона все токи суббури часто бывают сдвинуты к северу, в связи с близостью южного магнитного полюса. Для КАК соответствующей области в южном полушарии не видно, ее можно только предполагать на самом севере Австралии или на Новой Гвинее.

Суббури в 7—9 ч UT 7.04.2000 г. интересна тем, что все векторы тока в обоих полушариях были направлены на юго-восток. В данном случае сопряженной областью с ММВ можно считать CNB. Надо заметить, что во время этой суббури влияние бури уже ослабело. К 8 часам интенсивность ее уменьшилась почти вдвое, и в векторах тока видно четкое их увеличение с широтой. Для КАК и KNY сопряженной областью можно считать СТА, для PHU — LRM. На почти полном спаде магнитной бури в 16—17 ч видны вихри токов в северном и южном полушариях. Сопряженную область с CNB можно предполагать немного севернее ММВ, а для СТА — вблизи КАК, KNY, BMT. Различия состоят в том, что центр южного вихря находится у южного побережья Австралии, а центр северного вихря не виден, скорее всего, он где-то над Тихим океаном. Судя по наблюдениям в PHU, соответственные GNA и LRM векторы должны находиться в центре Азии.

В главную фазу бури 6.04.2000 г. непрерывно происходили суббури. В 18—19 ч UT четкая суббури наблюдалась в Австралии с векторами, соответствующими изменениям магнитного поля в 40—60 нТл, а на всех северных обсерваториях азиатского региона векторы тока не превышали 10—15 нТл. Южнее Австралии виден вихрь тока, а на обсерваториях северного полушария все небольшие вектора направлены на юго-восток, вследствие чего соответствия между севером и югом нет.

Во время главной фазы бури 6.04.2000 г. рассмотрена суббурия в 21—22 ч UT. Во время этой суббури видны несколько вихрей с центрами южнее Австралии, над Китаем, над северной Атлантикой, над

южной частью Северной Америки. Обсерватории PAF приблизительно соответствуют область NUR, но с токами различных направлений: в NUR — возвратный ток в полярную струю, а в PAF ток направлен в средние широты. В южном полушарии Дальневосточного региона суббурия была значительно интенсивнее, чем в северном. Сильный ток захватывал ASP, GNA, LRM. Соответствующий ему ток мог быть только на севере Азии. Разница в векторах между западной и восточной частями Австралии произошла из-за восхода Солнца. С восходом Солнца амплитуды суббури в приполярных областях резко падают, что осложняет определение сопряженных областей.

ВЫВОДЫ

— Интенсивность суббури в средних широтах в первую очередь зависит от того, как время внедрения активных частиц соотносится с местным, солнечным временем, далее оказывает влияние Главное магнитное поле Земли.

— По магнитным суббуриям нельзя выделить сопряженные точки в северном и южном полушариях, а только сопряженные области, узкие по широте и протяженные по долготе.

— При средней магнитной активности сопряженная область с PAF располагается в районе NUR, LOV, с AMS — BFE, WNG, KIV; с CZT — BDV, FUR, NCK.

— В северном полушарии иногда видно смещение сопряженных областей к западу, превышающее смещение геомагнитных меридианов относительно географических. В зоне полярной струи в местное дневное время суббури возникать не могут. Размеры вихрей тока суббури могут изменяться от $60-80^{\circ}$ до $130-140^{\circ}$. Если геомагнитный меридиан пересекает различные географические долготы, то на севере ночью может быть суббурия, а в южном полушарии днем ее может не быть. Положение обсерватории относительно центра вихря суббури влияет на оценку интенсивности. Интенсивность и направление токов в течении суббури могут существенно изменяться. На разных обсерваториях максимум суббури может смещаться по времени.

— Во время магнитных бурь токи суббури могут существенно изменяться. Северное и южное полушария становятся несимметричными. Могут возникать дополнительные фокусы. На фазе восстановления бури эти особенности исчезают.

— В Дальневосточном регионе в магнитно-спокойное время сопряженными можно считать области ММВ и CNB, СТА и KNY.

CONJUGATIVITY OF MAGNETIC SUBSTORMS
WITHIN MIDDLE LATITUDES OF THE NORTHERN
AND SOUTHERN HEMISPHERES

L. N. Yaremenko, T. A. Mozgovaya

The first attempts to distinguish conjugated sites of substorms within the northern and southern hemispheres revealed that it was not a point but an area, which is narrow in the latitudinal direction and distant in the longitudinal one. The area does not coincide with conjugated sites detected by whistles. According to data of observatories in the southern part of the Indian Ocean PAF, CZT and AMS, conjugated areas are chosen for each substorm from many European observatories situated on the same magnetic meridian. For PAF, at a quiet magnetic period conjugated area is detected near NUR or some northward, sometimes it is stretched up to LOV or BFE. During magnetic storms when PAF is subjected to the southern

polar flow or occurs southwards from its central line, the area conjugated with PAF in the north is situated near TRO, northward of SOD. The shift along L-shells is 4. Conjugated area with AMS in the case of slightly disturbed field may occur near BEL, NGK, WNG, at a quieter period near KIV or more eastward. Conjugated area with CZT is located near BUD, NCK, FUR, or in the case of very quiet conditions it can only be supposed in Greece or Turkey. In that case the current of substorm weakens very slowly in latitudinal direction, its intensity in NCK and TAM differs by 20–30 %. In America conjugated area with the station Academician Vernadsky is situated between FRD and OTT, moving along the latitude depending on magnetic activity. Conjugated area within the Australian-Far Eastern region is situated near ASP и STA, and the area conjugated with MMB is located in the region of CNB. Far Eastern region is specific by its instability. The intensities of substorm in Australia and Japan may change more than twofold in a short time.

УДК 550.385.36

© Л. Н. Яременко, Г. В. Мельник

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

МАГНИТНЫЕ БУРИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОЯСЕ
И ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Розглядаються особливості Dst-варіації в європейсько-африканському та австралійсько-далекосхідному меридіональному секторах. Зроблено спробу після виключення впливу суббур через різні залежності D_{st} і амплітуди суббур від широти по наземних спостереженнях H-складової магнітного поля виділити частину Dst, максимально наближену до створюваної кільцевим екваторіальним струмом DR. Отримано, що амплітуда Dst максимальна на денному боці, а не на нічному, як вважалося раніше. У деяких випадках на півночі Європи спостерігається додатна D_{st} . Для розділення поля бурі на зовнішню та внутрішню частини проведено сферичний гармонічний аналіз. В Африці внутрішня частина поля бурі складає близько половини від інтенсивності поля зовнішньої частини. В австралійсько-далекосхідному регіоні ці поля рівні, що свідчить про високу провідність мантії в цьому регіоні.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с общепринятыми представлениями одной из наиболее полных характеристик магнитной бури являются D_{st} -вариации в H -компоненте, которые генерируются в основном кольцевым экваториальным током DR, токами хвоста магнитосферы, токами на границе магнитосферы. Вся система этих токов определяется приходом солнечных заряженных частиц, межпланетным магнитным полем, изменением составляющих этого поля, увеличением скорости и давления солнечного ветра и т. д.

Экваториальный кольцевой ток не является правильным кольцом, он довольно различен на ночной и дневной сторонах Земли и может отличаться при разных бурях.

Изменения магнитного поля во время магнитной бури состоят из нескольких фаз: начальной, глав-

ной и фазы восстановления, представляющих вместе вариацию D_{st} , на которую накладываются магнитные суббури.

В данной работе рассматриваются особенности D_{st} -вариации магнитного поля для магнитных бурь: 15/16.05.1997 г., 6.08.1998 г., 15/16.07.2000 г., 31.03/1.04.2001 г., 11/12.04.2001 г. и 7/8.09.2002 г. D_{st} -вариация определялась путем исключения из наблюденных величин H -компонента суточной вариации за предшествующий и последующий за бурей спокойные дни для 15–20 обсерваторий экваториального пояса с привлечением среднеширотных обсерваторий. В данном случае была сделана попытка выделить вариацию по времени бури D_{st} без влияния суббурь, используя различные зависимости D_{st} и суббурь от широты. Максимально приближенная к току DR часть D_{st} выделялась по наземным наблюдениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При рассмотрении особенностей протекания указанных магнитных бурь выяснилось, что уменьшение H происходит довольно быстро (от 1 до 3-4 ч), на всех 15–20 обсерваториях, данные которых могли быть использованы, D_{st} увеличивается от утренних часов к вечерним. В двух случаях D_{st} была максимальной в полуденное время (11.04.2001 и 07.09.2002 гг.), в четырех случаях максимум D_{st} наблюдался в обсерваториях, где было 17–18 ч местного времени. В ночное местное время происходило уменьшение величины D_{st} . Минимальной D_{st} наблюдалась в местности вблизи полночи или предутренние часы. Разница между максимальными и минимальными значениями для бури 31.03./1.04.2001 г. составила 160 нТл.

Таким образом, D_{st} имеет максимум на дневной стороне, а не на ночной, как считалось ранее (рис. 1).

По широте D_{st} уменьшается к полярным широтам, но в записях обсерватории HRN обнаружилась положительная D_{st} . При более интенсивных бурях зона положительных D_{st} может занимать всю северную Европу от NUR до BFE.

В бурю 15/16.07.2000 г. (рис. 2) положительная D_{st} наблюдалась в Европе в 14–20 ч UT с максимумом в 17–18 ч UT. По амплитуде (определенной с исключением суббури) наибольшие величины D_{st} отмечены в Соданкуля SOD, Абиско ABK (800 нТл), Тромсе TRO. К югу идет постепенное уменьшение и в районе Бельска BEL амплитуда положительной D_{st} составляет порядка 100 нТл. Еще южнее на всех обсерваториях регистрируется

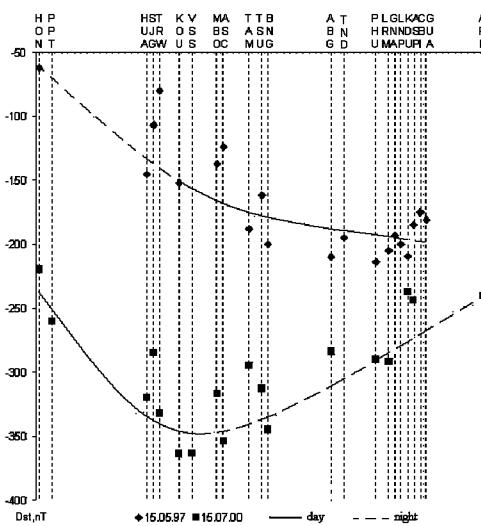


Рис. 1. Значения D_{st} в минимуме для магнитных бурь 15.05.97 г. и 15.07.2000 г.

отрицательная D_{st} . На других долготах положительная D_{st} во время этой бури видна в Нарсарсугаке NAQ в 15–20 ч UT (максимум приблизительно в 13 ч LT), в Бейкер-Лейк BLC в 13–20 ч UT (максимум в 9 ч 30 м LT), в Барроу BRW и Колледже СМО с максимумами около 6 ч LT.

В бурю 15.05.1997 г. (рис. 3) положительная D_{st} наблюдалась на северных обсерваториях в Европе с максимумом в SOD +500 нТл в 12–13 ч UT; севернее, в ABK, — с амплитудой 350 нТл, в TRO — +250 нТл. Еще севернее, в Хорзунде (HRN), D_{st} вновь стала отрицательной. К югу положительная D_{st} видна в NUR +200 нТл в 13–14 ч UT, в Лове (LOV) +150 нТл, в Лервике (LER) +100 нТл. На более южных обсерваториях D_{st} была отрицательной. По долготе явление положительного значения D_{st} наблюдалось в Годхауне (GDH) в 17 ч UT (или 11 ч LT) +150 нТл и в Кембридж-Бей (CBB) в 7 ч LT.

Таким образом, это явление возникает местным утром и продолжается в течение 4–6 ч. В Европе оно более продолжительное, в Америке сокращается до 2–3 ч и наблюдается на одной-двух обсерваториях. Сравнивая записи различных обсерваторий в Европе, видно, что это именно влияние D_{st} , на которое накладываются полярные суббури. Ранее в

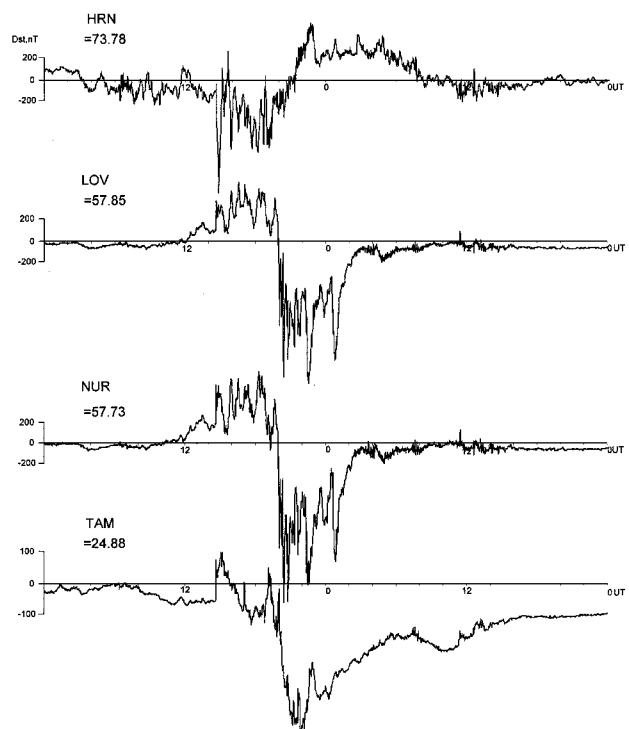
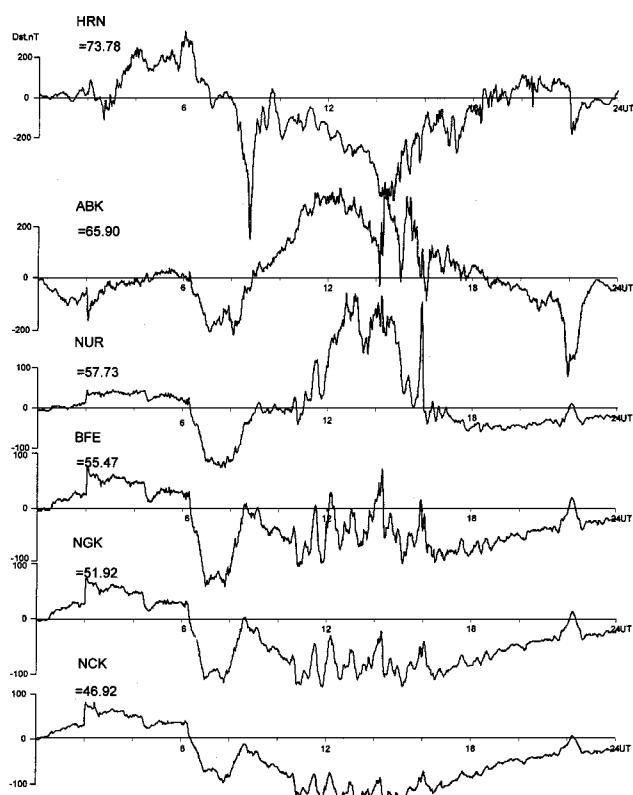


Рис. 2. Вариации D_{st} во время магнитной бури 15/16 июля 2000 г.

Рис. 3. Вариации D_{st} во время магнитной бури 15 мая 1997 г.

работах по полярным областям оно интерпретировалось как длительное полярное возмущение [1, 2]. На самом деле это влияние тока DR, который, по-видимому, проникает в полярные широты по силовым линиям на утренней стороне, что согласуется с данными [3]. Суббури при этом происходят своим чередом, накладываясь как на положительную, так и на отрицательную D_{st} .

По результатам наблюдений магнитной бури 06/07.04.2000 г. в европейско-африканском и австралио-азиатском регионах был выполнен сферический гармонический анализ с целью разделения поля бури на внешнюю и внутреннюю части. Так как вариации D_{st} уменьшаются от экватора к полюсам, а магнитные суббури к северу и югу увеличивают свои амплитуды, была сделана попытка, исключая суббури, выделить часть, создаваемую током DR. Использовались минутные значения следующих обсерваторий: в европейско-африканском регионе — Нимек (NGK), Фюрстенфельдбрук (FUR), Будков (BDV), Нагисенк (NCK), Сан-Пабло-Толедо (SPT), Таманрассет (ТАМ), Мбур (MBO), Банги (BNG), в южном полушарии — Тананараве (TAN), Хатебишоек (HBK), Германус (HER), Мартин-де-Вивес (AMS); в австралио-азиатском регионе

108

— Мемамбецу (MMB), Баянг Минг Томбс (BMT), Какиока (КАК), Каноя (KNY), Чичииджима (CBI), Лунпинг (LNP), Пхитхай (PHU), Гуам (GUA), Апиа (API), Чартер — Тоуэрс (STA), Лермонт (LRM), Алиса-Спрингс (ASP), Гнангара (GNA), Канберра (CNB), Еурвелл (EYR), расположенные по геомагнитной широте. Профиль обсерваторий с севера и с юга ограничивался зонами протекания полярных электроструй.

Сферический гармонический анализ (СГА) выполнен по формулам:

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n (r_n^m \cos mt + s_n^m \sin mt) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta},$$

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n (u_n^m \cos mt + v_n^m \sin mt) P_n^m(\cos\theta).$$

Время отсчитывалось от начала бури. Так как начальные фазы бурь недлительны, иногда почти отсутствуют, главные фазы большей часть продолжаются 2–3 ч, а фаза восстановления длится 2–3 сут, основное внимание было обращено на главную фазу и область минимума X . Чтобы она не нивелировалась при анализе, фаза восстановления была искусственно сокращена так, чтобы вся буря закончилась в 24 ч. Это дало возможность иметь больше точек, характеризующих главную фазу и область минимума. Разброс точек между данными отдельных обсерваторий обусловлен, в основном, местными причинами и неравномерностью течения токов. Кроме основного тока в магнитосфере, направленного с востока на запад, по наблюдениям Y явно видны меридиональные токи. Интенсивность создаваемых ими вариаций Y достигает 60–100 нТл в районе Японии и Китая, 200 нТл в р-не Макуори, 200–300 нТл на обсерваториях вблизи Северного Ледовитого океана, 150–200 нТл в Бельске, больше 100 нТл в Сахаре в ТАМ, 100–120 нТл в центре Африки в Банги. Все это вносит искажения в результаты наблюдений. Поэтому поэтапно при проведении СГА вносились некоторое осреднение в исходные данные и коэффициенты гармонического анализа. Результаты СГА приведены в таблице. Далее по этим коэффициентам было проведено разделение полей на внешнюю и внутреннюю части по формулам

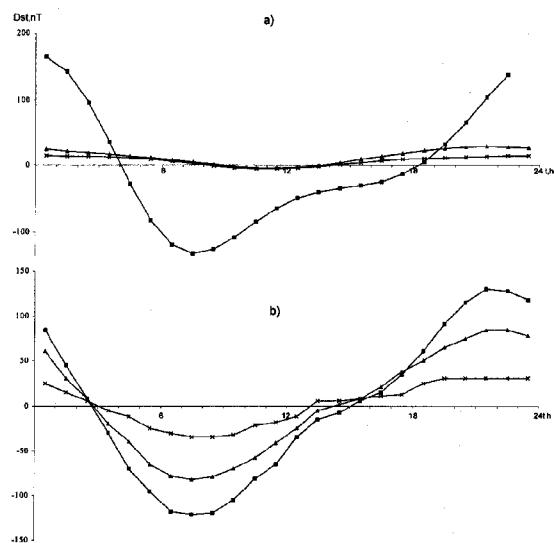
$$u_n^m = (n+1)g_n^m - nj_n^m, \quad v_n^m = (n+1)h_n^m - nk_n^m,$$

$$r_n^m = g_n^m + j_n^m, \quad s_n^m = h_n^m + k_n^m,$$

где g_n^m и h_n^m — коэффициенты, относящиеся к внутреннему полю, j_n^m и k_n^m — к внешнему полю. По данным таблицы и рис. 4 можно видеть, что в Африке коэффициенты внутренней части почти

Коэффициенты сферического анализа для магнитной бури 06/07.04.2000 г.

m/n	1	2	3	4	1	2	3	4	m/n	1	2	3	4	1	2	3	4
Евро-африканский меридиональный сектор																	
			s_n^m				r_n^m								s_n^m		
1	5.32	-56.50	-3.00	-11.15	-24.68	78.28	-0.15	22.65	1	-40.42	-28.20	-11.95	-10.34	49.44	80.60	10.51	11.40
2		31.30	16.57	-9.99		-16.96	0.70	-3.56	2		25.62	14.94	8.39		54.36	22.99	17.80
3			1.89	-0.78			-5.83	-2.37	3			2.63	3.64			2.21	-0.23
4			0.58				-2.66		4				-0.46				-0.05
			u_n^m				v_n^m								u_n^m		
1	0.14	-10.09	-4.91	8.29	-2.88	27.54	-27.15	6.91	1	-4.68	-18.25	-5.76	8.46	7.69	-2.48	8.93	6.95
2		6.48	-16.81	4.98		-1.88	0.04	-1.73	2		1.67	3.35	1.47		-2.55	0.11	1.51
3			-0.64	-4.20			1.69	-4.32	3			3.79	5.02			-0.62	0.50
4			-3.33				-2.55		4				0.79				-0.25
			f_n^m				k_n^m								f_n^m		k_n^m
1	-16.50	48.99	0.62	11.66	4.51	-39.41	2.16	-6.96	1	30.40	48.86	4.73	7.11	-25.39	-13.27	-6.01	-6.68
2		17.48	11.87	-6.10		-9.80	0.39	-1.78	2		33.13	13.12	9.72		15.04	8.06	4.50
3			1.17	0.03			-3.57	-0.84	3			1.35	-0.18			0.96	1.46
4			0.69				-1.19		4				0.00				-0.34
			g_n^m				h_n^m								g_n^m		h_n^m
1	-8.18	29.29	-0.77	10.99	-0.81	-17.09	-5.16	-4.19	1	19.04	31.74	5.78	4.29	-15.03	-14.93	-5.94	-3.66
2		13.82	4.70	-3.89		-7.16	0.31	-1.78	2		21.23	9.87	8.08		10.58	6.88	3.89
3			0.78	-0.81			-2.26	-1.53	3			0.86	-0.05			1.67	2.18
4			-0.11				-1.47		4				-0.05				-0.12

Рис. 4. Синтезированные поля для $\Phi = 5^\circ$ в австралийском (a) и африканском (б) секторах

вдвое меньше внешней, а в австралио-азиатском регионе они почти равны, т. е. проводимость в мантии в этом регионе настолько выше по сравнению с Африкой, что внутренний индуцированный ток приблизительно равен внешнему. Глубины индуцированных токов магнитных бурь соответствуют средней мантии. Это доказывает, что в средней мантии проводимость изменяется по горизонтали и различна в отдельных регионах.

ВЫВОДЫ

1. При выделении максимально приближенной к создаваемой током DR части D_{st} по наземным наблюдениям получено, что она имеет максимум на дневной стороне.

2. Ток DR может проникать по силовым линиям в полярные широты и создавать положительную D_{st} , область которой при сильных магнитных бурях распространяется до 55° геомагнитной широты.

3. По результатам сферического анализа установлено, что внутренний ток в Африке приблизительно вдвое слабее внешнего, а в австралио-азиатском регионе эти токи равны. Можно предположить, что в средней мантии проводимость изменяется по горизонтали и различна в отдельных регионах.

1. Гельберг М. Г., Кершенгольц С. З. Авроральные возмущения в период прихода к Земле магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 1.—С. 36—41.

2. Гельберг М. Г., Кершенгольц С. З., Шараева С. В. Взаимосвязь между классами солнечных источников корпускулярных потоков межпланетной плазмы и типами длительных авроральных возмущений на Земле // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 1.—С. 23—32.

3. Farrugia F. J. et al. Geoeffectiveness of try Wind magnetic clouds: a comparative study // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 17261—17278.

MAGNETIC STORMS IN THE EQUATORIAL BELT AND IN POLAR REGIONS

L. N. Yaremenko, G. V. Melnik

The features of the Dst-variations in Europe-African and Australian-Far Eastern meridional sectors are considered. An attempt is made

to select Dst-part, which is the most approached the field created by the ring current DR, using the 1-min ground magnetometer H-component measurement data. The substorm contribution is excepted following the difference of the latitude depending on the Dst-variation and the substorm amplitude. It is found that the Dst-variation has more amplitude on the daily earth side, not on the nightly one as it was supposed before. For some storms the positive Dst-variation

in the northern Europe are observed. The storm field division on the external and internal parts is achieved by means of the sphere harmonic analysis. In Africa, the internal field part equals about a half of the external part, while in the Australian-Far Eastern region these fields are equal, which points to a high mantle conductivity in the region.

УДК 550.388, 621.371

© В. Н. Лысенко, Ю. В. Черняк

Інститут іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Харків

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ

Під час сильної магнітної бурі 30 травня 2003 р. на радарі некогерентного розсіяння (НР) Інституту іоносфери протягом 1.5 год в діапазоні висот 700—1200 км спостерігалася аномальна зміна спектру розсіяних іоносферною плазмою сигналів. Такий ефект на харківському радарі НР зареєстровано вперше. Наведено результати спостережень і методика вимірювань параметрів збуреної іоносфери.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика и прогнозирование состояния возмущенной ионосферы во время геомагнитной бури являются актуальными направлениями физики ионосферы. Ее исследование в спокойном и возмущенном состоянии методом некогерентного рассеяния (НР) радиоволн позволяет определить экспериментально основные параметры ионосферной плазмы, такие как электронная концентрация N_e , ионная T_i и электронная T_e температуры, скорость дрейфа V_d ионосферной плазмы, ионный состав по измеренным корреляционным либо спектральным функциям НР-сигнала. Методики обработки НР-сигнала обычно не отличаются для спокойной и возмущенной ионосфер, так как связь между ними и спектром тепловых флуктуаций электронной плотности не изменяется в условиях естественных возмущений. Целью работы является изложение методики измерения параметров возмущенной ионосферы и аномальных результатов наблюдений, полученных на Харьковском радаре впервые.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ СИГНАЛА

Радар НР Института ионосферы [3] находится в точке с географическими координатами 49.6° N;

36.3° E, геомагнитными координатами 45.7° N, 117.8° E. Во время ионосферной бури его параметры составляли: рабочая частота $f_0 = 158$ МГц, импульсная мощность 2.4 МВт, длительность зондирующего импульса (ЗИ) $T_{SI} = 790$ мкс, внутриимпульсная модуляция не применялась. Ширина диаграммы направленности зенитной двухзеркальной антенны Кассегrena диаметром 100 м равна 1° , уровень боковых лепестков в области $\pm 30^\circ$ не превышает -25 дБ. Во время измерений радар работал в режиме круговой поляризации. Радиоприемный тракт обеспечивал выделение синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала на выходах синхронных детекторов. Полоса пропускания приемного тракта $2\Delta f = 19$ кГц. Применялись три системы обработки — двухканальные программируемые корреляторы. Период квантования сигнала по времени и задержки составлял 30 мкс.

Оценки действительной $R_{Re}(t, \tau)$ и мнимой $R_{Im}(t, \tau)$ составляющих комплексной корреляционной функции (КФ) НР-сигнала, позволяющих компенсировать рост дисперсии с увеличением τ_k , нормированной КФ $r(t, \tau)$ и спектральной функции следующие:

$$R_{IS Re, Im}^*(t_j, \tau_k) = \frac{1}{P_N} \frac{1}{b-a} \int_a^b [R_{Re, Im}(x, \tau_k)]^* dx,$$

$$r^*(t_j, \tau_k) = R_{IS}^*(t_j, \tau_k) / q^*(t_j) K(t_j, \tau_k),$$

$$S(t_j, f_i) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K_{\max}} [r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k) \cos 2\pi f_i \tau_k - r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k) \sin 2\pi f_i \tau_k].$$

Здесь $a = t_j - m\Delta\tau - \tau_k$, $b = t_j + m\Delta\tau$, $m = 0, 1, 2, \dots$, t_j — время запаздывания ($t_j = 2h/c$, c — скорость света), τ_k — задержка КФ, $[R(t_j, \tau_k)]^*$ — оценка авто или взаимной КФ парной выборки, $K_{\max} = 19$, $q(t_j) = R_{\text{ISRe}}(t_j, 0)/R_N(0)$ — отношение сигнал/шум, $K(t_j, \tau_k)$ — коэффициент коррекции, который учитывает длительность и форму ЗИ и изменение рассеянной мощности в импульсном объеме [2], P_N — мощность шума, равная $0.5[R_N(0) + R_{NQ}(0)]$ для действительной составляющей или $[R_N(0) + R_{NQ}(0)]^{1/2}$ для мнимой. При вычислении огибающей коэффициента корреляции ее знак обычно определяется знаком действительной составляющей, так как отношение $r_{\text{Im}}(t_j, \tau)/r_{\text{Re}}(t_j, \tau) \ll 1$. Скорость дрейфа ионосферной плазмы V_d определяется по частоте Доплера

$$V_d^*(t_j) = \frac{\lambda}{2\pi K_{\max}} \sum_{k=1}^{K_{\max}} \Omega_k, \\ \Omega_k = \Delta\varphi_1(t_j, \tau_k)/\tau_k, \quad (1)$$

(где $\Delta\varphi_1(t_j, \tau_k)$ — приращение фазы при $\tau = \tau_k$ относительно фазы при $\tau = 0$) или

$$\Omega_k = \Delta\varphi_2(t_j, \tau_k)/\Delta\tau_k. \quad (2)$$

Здесь $\Delta\varphi_2(t_j, \tau_k)$ — приращение фазы при $\tau = \tau_{k+1}$ относительно фазы при $\tau = \tau_k$, $\operatorname{tg}\varphi = r_{\text{Im}}(t_j, \tau)/r_{\text{Re}}(t_j, \tau)$. Для НР-сигнала применение выражения (1) дает меньшую статистическую погрешность и применяется для $V_d < 250$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 1 приведены оценки спектров тепловых флуктуаций электронной плотности, полученных по измеренным КФ НР-сигнала во время сильной магнитной бури 29—31 мая 2003 г., которой предшествовали рентгеновские вспышки на Солнце и выбросы коронарной массы. Обычно наблюдаемый спектр рассеивающей среды имеет два одинаковых по величине симметричных максимума, соответствующих ионно-акустическим волнам, бегущим по направлению к наблюдателю и от него. Начиная с 1 ч 12 мин, на дальностях 900—1300 км, где до этого отношение сигнал/шум не превышало 0.03—0.05, появился более мощный, неустойчивый сигнал с узкополосным спектром. С 1 ч 30 мин до 2 ч 15 мин наблюдался устойчивый (неисчезающий) квазикогерентный сигнал, по своим корреляционным, спектральным и временными характеристикам отличный как от НР-сигнала, так и от сигналов, отраженных от летательных аппаратов. При этом максимальное значение мнимой составляющей КФ сигнала (на рис. 1 не показана) увеличилось в 5—10 и более раз, что свидетельствовало о большой радиальной скорости. Обработка такого сигнала по обычному применяемой методике оказалось некорректной, так как для интервала дальностей 800—1300 км нельзя применять увеличивающейся с высотой сглаживание высотных зависимостей значений КФ, выражение (1) дает в два раза меньшее значение скорости V_d , знак огибающей КФ нельзя считать соответствующим знаку действительной составляющей, так как абсолютные значения обеих составляющих соизмеримы. Обычно применяемая методика отбраковки данных, пораженных когерентными отражениями, может скрыть такие эффекты.

Из результатов (рис. 1) специальной обработки измеренных комплексных КФ (ограничено сглажи-

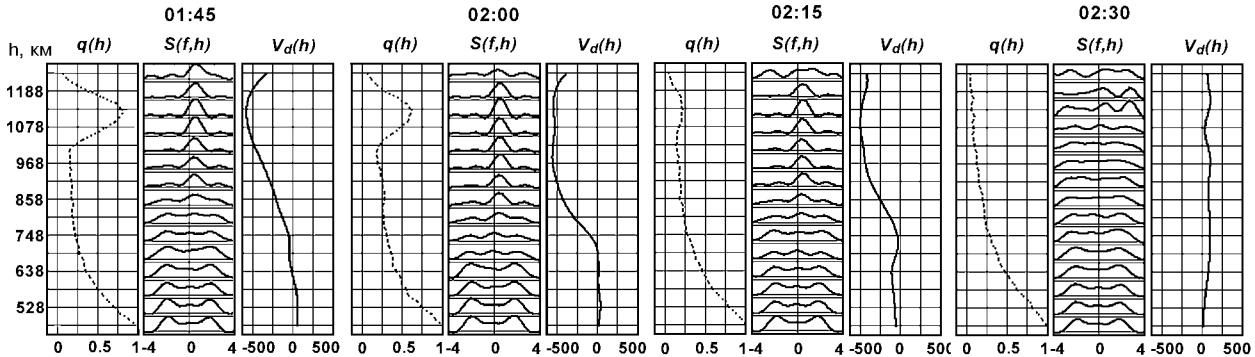


Рис. 1. Измеренные характеристики (отношение сигнал/шум $q(h)$, спектральная плотность мощности $S(f,h)$, скорость дрейфа плазмы $V_d(h)$) в период с 1:45 по 2:30 местного времени 30.05.2004 г.

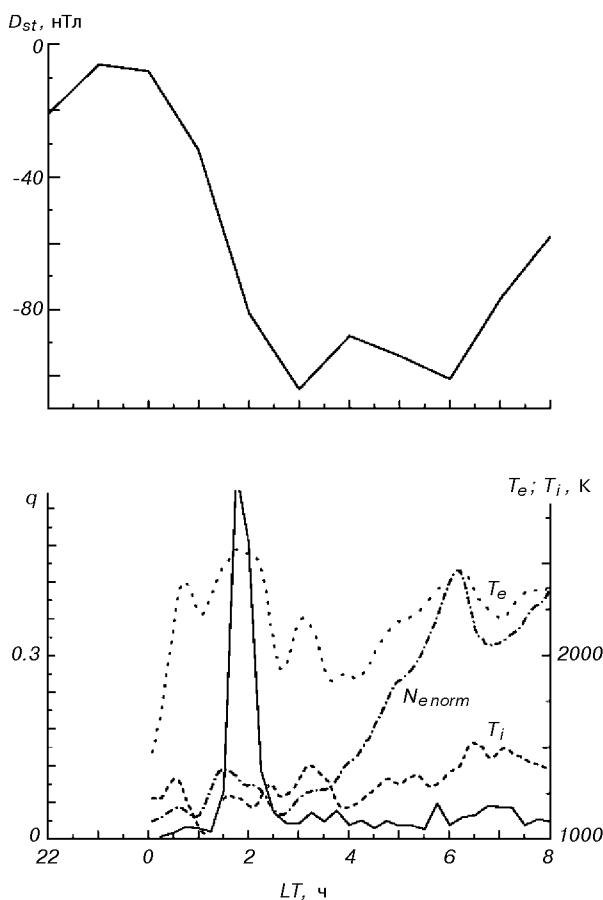


Рис. 2. Временные вариации D_{st} индекса и отношения q сигнал/шум на высоте 1100 км, а также измеренных параметров ионосферной плазмы ($N_{e\text{norm}}$, T_e , T_i) на высоте 308 км 30.05.2003 г. Время местное

вание высотных зависимостей $R_{IS}(h, \tau_\kappa)$; учтено, что значения действительной и мнимой составных соизмеримы по модулю; для вычисления скорости дрейфа применялось выражение (2) видно, что выше 800 км сигнал состоит из двух составляющих — некогерентной и квазикогерентной. Время накопления для одного интегрального сеанса измерений составляет 15 мин (получено при суммировании 15 измеренных 1-мин сеансов), указанное время соответствует концу сеанса. Измеренная корреляционным методом скорость достигает значения -500 м/с, что соответствует рассчитанным по КФ спектрам. На спектрах с высот 1133 и 1188 км, полученных в интервале времени 2 ч 15 мин — 2 ч 30 мин, когда квазикогерентный сигнал значительно уменьшился, видно, что в спектре НР-сигнала максимумы отличаются по величине. Отме-

тим, что корректные температуры заряженных частиц без разделения наблюдаемых эффектов получить затруднительно, так как полученные КФ сильно отличаются от применяемых теоретических КФ.

Представленные результаты получены во время главной фазы магнитной бури. Индекс $K_p = 8$.

На рис. 2 приведены временные вариации D_{st} -индекса, отношения q сигнал/шум на высоте 1100 км 30 мая 2003 г., ионная и электронная температуры на высоте 308 км. Время киевское. Видно, что необычное эхо наблюдалось во время резкого уменьшения D_{st} -индекса примерно от -40 до -130 нТл. Отношение сигнал/шум на высоте около 1100 км зарегистрировано на порядок выше, чем для обычного НР-сигнала. С 1 ч до 1 ч 30 мин ночи наблюдалось увеличение электронной температуры до 2500 К. Наблюдался также рост ионной температуры и электронной концентрации. Обычно в это время температура ионов равна температуре электронов. При такой космической погоде возможно смещение к экватору главного ионосферного провала, южная граница аврорального овала может расширяться до геомагнитных широт 51° — 45° [1]. 29 мая спутником GOES-8 (W75) зарегистрированы потоки протонов и электронов с высокими энергиями. В работе [4] показано, что во время сильной магнитной бури создаются условия для образования неоднородностей электронной концентрации, вытянутых вдоль геомагнитного поля и расположенных в области Е на высоте около 110 км. В этом случае прием возможен боковыми лепестками зенитной антенны. Измеренный нами низкочастотный спектр наиболее соответствует области нижней ионосферы. Наблюдаемые неодинаковые максимумы спектральной функции НР-сигнала может быть вызван дрейфом между ионами и электронами, т. е. сильными токами в внешней ионосфере. Подобное когерентное эхо дважды регистрировались на среднеширотном Иркутском радаре в 1998 и 2000 гг.

Выводы

Во время сильной геомагнитной бури получены аномальные квазикогерентные сигналы с наклонными дальностями 800—1300 км. Для обработки таких сигналов обычная методика мало пригодна. Температуры заряженных частиц, электронная концентрация, скорость ионного дрейфа существенно искаются. В то же время полученные результаты могут дать дополнительную информацию о процессах в ионосфере во время магнитных бурь.

- Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. та ін. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмиче-

- ской бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 г. // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 12—25.
2. Лысенко В. Н. Изменение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 3.—С. 365—368.
3. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
4. Shprunov B. G., Medvedev A. V., Nosov V. E. Ionospheric observation during July 15—16 2000 major geomagnetic storm // Abstracts of 8 joint internat. simp. «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric Physics». — Irkutsk, 2001.—P. 211.

SOME PECULIARITIES OF THE PROCEDURE FOR DETERMINATION OF IONOSPHERIC PLASMA PARAMETERS DURING NATURAL DISTURBANCES IN THE IONOSPHERE

V. N. Lysenko, Yu. V. Cherniak

An anomalous change of the spectrum of signals scattered by the ionospheric plasma was observed with the incoherent scatter radar of the Institute of Ionosphere during the strong geomagnetic storm on 30 May 2003. The change was observed for 1.5 h at heights from 700 to 1200 km. Such phenomenon was detected with the use of Kharkiv incoherent scatter radar for the first time. The results of the observations are presented and a procedure for determination of the disturbed ionosphere is described.

УДК 550.388+520.16+523.31+523.9:520.86

© В. П. Бурмака¹, В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Харків
²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

РАДАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ИОНОСФЕРЕ, СОПУТСТВОВАВШИХ ПОЛЕТАМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Вивчено хвильові збурення, які супроводжували три старти ракет важкого класу з космодрому Байконур. Вплив стартів призводить до зміни характеру хвильових збурень, варіацій їхнього спектрального складу та амплітуд.

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты, вызванные стартами ракет (СР) и полетами ракетно-космической техники, изучаются более 40 лет. Как правило, эти эффекты развиваются вдоль траектории полета аппарата. Значительно меньшее число работ посвящено исследованию возможных процессов на большом удалении от траектории. В этом случае проблематичным является само существование эффектов. Здесь с помощью метода некогерентного рассеяния (НР) предпринята попытка частично восполнить пробел в исследованиях волновых возмущений (ВВ) на удалениях около 2 тыс. км от космодромов. Радар НР расположен вблизи г. Харьков (49° 36' с. ш., 36° 18' в. д.) [6]. Основные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м², коэффициент усиления антенны — около 10 000, ширина основного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности около 1°, импульсная и средняя мощности радиопредающего устройства — до 3.6 МВт и 100 кВт

соответственно.

Для выявления ВВ использовалась методика, описанная нами в работе [3]. В качестве исходных выбирались высотно-временные зависимости НР-мощности $P_s(z, t)$. После удаления тренда $\langle P_s \rangle$, вычисляемого на интервале времени 60 мин, создавались массивы $\delta P_s(z, t) = P_s - \langle P_s \rangle$. Они подвергались дальнейшему анализу. Для относительных амплитуд ВВ справедливо соотношение: $\delta_N = \Delta N/N \approx \delta P_s/\langle P_s \rangle$.

Старт ракеты «Союз» 18 октября 2003 г. Целью наблюдений был поиск ВВ в утреннее время при старте сравнительно мощной ракеты на относительно небольшом удалении от места регистрации. Параметры радара обеспечивали значения отношения сигнал/шум $q = 0.1...5$ в ночное и дневное время соответственно. При этом $\delta_{N\min} \approx 1...8\%$.

Сведения о ракете. Российская ракета «Союз» относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 305 т, начальная тяга 4.14 МН, высота 46.1 м, низкоорбитная полезная нагрузка 6855 кг на высоте 200 км. Параметры нулевой ступени

следующие: масса 4×44.4 т, тяга 4×1.02 МН, диаметр 2.7 м, высота 19.6 м, время работы 120 с. Параметры первой ступени: масса 105.4 т, тяга 1 МН, диаметр 3 м, высота 27.8 м, время работы 286 с. Вторая ступень имела массу 25.2 т, тягу 0.3 МН, диаметр 2.7 м, высоту 6.7 м, время работы 300 с.

Старт ракеты с космодрома Байконур осуществлен в 05:38 18 октября 2003 г. Расстояние между местом наблюдения и космодромом равно $R \approx 2050$ км.

Результаты наблюдений. Измерения для диапазона высот 125—1000 км выполнены с 21:00 17 октября до 15:00 18 октября 2003 г. Старт пришелся на утреннее время, отношение q в средней (до 300 км) и внешней ионосфере составляло 3—5 и 0.3—1 соответственно. При этом $\delta_{N\min} \approx 1\ldots3\%$. Параметры радара приведены в таблице.

Эффекты от утреннего терминатора в этот день были слабыми. К моменту старта их проявления не наблюдалось.

Через 3—4 ч после восхода Солнца в ионосфере электронная концентрация заметно возросла на всех высотах. При этом также увеличилась в 5—10 раз абсолютная амплитуда ΔN ВВ (рис. 1). Колебания δP_s и ΔN стали более упорядоченными. На высотах $z \approx 140\ldots180$ км период колебаний составлял 40—45 мин. В то же время на высотах 200—500 км, кроме указанного периода, был хорошо выражен период $T \approx 110$ мин. Продолжительность процесса с $T \approx 110$ мин была около 5 ч. Заметим, что этот процесс стал проявляться через 13—20 мин после старта.

Относительная амплитуда δ_N до старта была 2—4 %, а после него возросла до 3—5 % (рис. 1). Для колебания с $T \approx 110$ мин $\delta_N \approx 10\%$.

Старт ракеты «Протон» 10 декабря 2003 г. Целью этих наблюдений было изучение возможности обнаружения ВВ, вызываемых стартами ракет в ночное время зимой. При этом значения электронной концентрации были достаточно низкими ($N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$), что привело к низким значениям q .

Сведения о ракете. Российская ракета «Протон»

Основные параметры радара, интервал ΔT_0 предварительной обработки и шаг Δz_0 по высоте

Дата	P_i , МВт	t , мкс	Диапазон высот, км	ΔT_0 , мин	Δz_0 , км
18 октября 2003 г.	2.1	135	125—1005	1.0	18
10—11 декабря 2003 г.	2.2	135	125—1005	1.0	18
27—28 декабря 2003 г.	2	780	125—1005	1.0	18

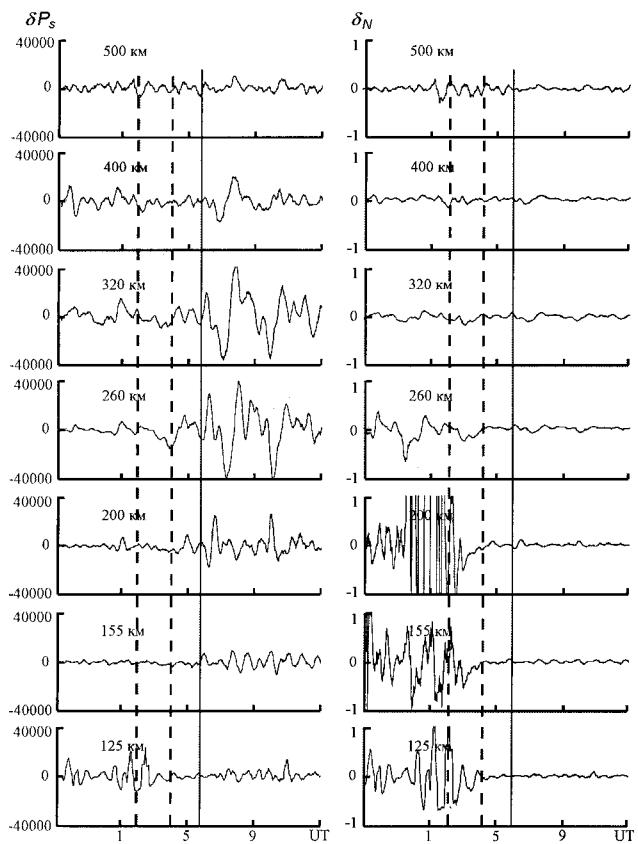


Рис. 1. Временные вариации δP_s амплитуд и относительных амплитуд δ_N ВВ во время старта ракеты «Союз» 18 октября 2003 г. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли. Здесь и далее сплошной вертикальной линией указано время старта

относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 711 т, начальная тяга 8.84 МН, высота 59 м, низкоорбитная полезная нагрузка 19.76 т на высоте 200 км. Параметры первой ступени: масса 450.5 т, тяга 10.46 МН, диаметр 4.2 м, высота 21.2 м, время работы 124 с. Параметры второй ступени: масса 167.8 т, тяга 2.4 МН, диаметр 4.2 м, высота 14 м, время работы 206 с. Третья ступень имела массу 50.7 т, тягу 0.63 МН, диаметр 4.2 м, высоту 6.5 м, время работы 238 с; четвертая — массу 17.3 т, тягу 0.085 МН, диаметр 3.7 м, высоту 7.1 м, время работы 600 с.

Результаты наблюдений. Измерения выполнены в диапазоне высот 125—1000 км с 14:00 10 декабря до 6:00 11 декабря 2003 г. Как уже отмечалось, старт имел место в ночное время. Приемлемые значения $q \geq 0.1\ldots0.2$ были лишь в

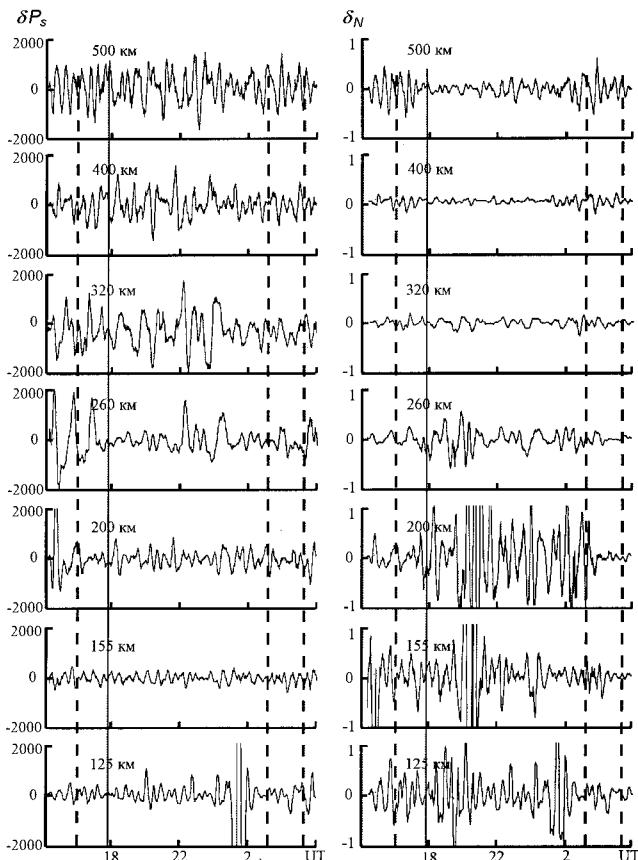


Рис. 2. Временные вариации амплитуд (левая панель) и относительных амплитуд (правая панель) ВВ во время старта ракеты «Протон» 10 декабря 2003 г. Вертикальными пунктирумыми линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли и захода на уровне 450 км

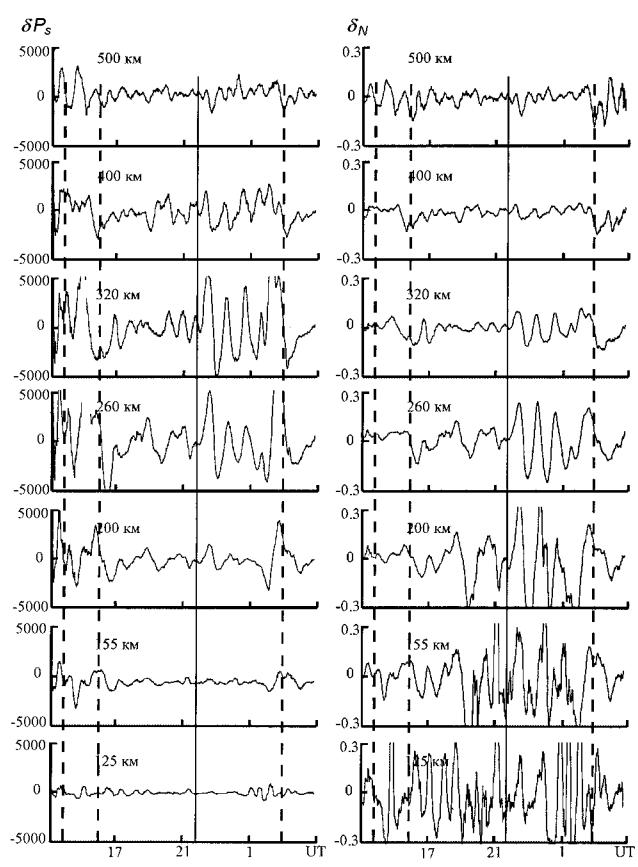


Рис. 3. Временные вариации амплитуд (левая панель) и относительных амплитуд (правая панель) ВВ во время старта ракеты «Союз» 27 декабря 2003 г. Вертикальными пунктирумыми линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 450 км и захода на высоте 450 км и на уровне Земли

диапазоне высот 290—455 км. Важно, что зимней ночью значение P_s выше, чем в переходное время суток. Особенно четко это проявляется на высотах $z > 350$ км. Такое поведение $P_s(t)$ обусловлено ночных потоками плазмы из плазмосферы.

ВВ в ионосфере наблюдались как до, так и после старта (рис. 2). Абсолютные значения их амплитуды во времени изменялись сравнительно слабо. После старта значения относительной амплитуды на высотах $z \leq 350$ км несколько увеличились. Со стартом ракеты, по-видимому, связаны изменения характера сигнала при $\Delta t_1 = 15\ldots20$ мин и $\Delta t_2 = 60\ldots70$ мин. Лучше всего эти изменения в $\delta P_s(t)$ наблюдались на высотах 308—418 км.

Старт ракеты «Союз» 27 декабря 2003 г. имел место в 21:30 с космодрома Байконур. Целью этих наблюдений было изучение возможности вы-

явления ВВ, вызванных стартом тяжелой ракеты в ночное время вскоре после зимнего солнцестояния. Для обеспечения достаточных значений q использовались импульсы длительностью 780 мкс. При этом в зависимости от высоты и времени наблюдения $q \approx 0.2\ldots10$.

Измерения для диапазона высот 125—1000 км выполнены в интервале времени 15:00 27 декабря — 04:00 28 декабря 2003 г.

Результаты наблюдений. Временные вариации δP_s и ΔN показаны на рис. 3. Из рис. 3 видно, что значительное увеличение амплитуд δP_s имело место на высотах 250—350 км вскоре после старта. Эти изменения продолжались более 5 ч.

Как видно из рис. 3, сначала (примерно до 17 ч) имели место слабые вариации δ_N , по-видимому, связанные с прохождением вечернего терминатора.

Затем в течение 4—5 ч наблюдалась квазипериодические вариации δ_N с относительной амплитудой, не превышающей 10 %. После 22 ч она увеличилась до 30 %. Колебания стали близкими к гармоническим, их период составлял около 65 мин. Колебания продолжались не менее 4 ч. После 2 ч возник аperiодический процесс с $\delta_N \approx 20\%$ и длительностью больше 1 ч. Колебания, наблюдавшиеся после 21:30, скорее всего, связаны со стартом. Их амплитуда существенно зависела от высоты. Первые 50 км амплитуда δ_N увеличивалась с ростом высоты, а затем в диапазоне высот 200—400 км она убывала почти на порядок. Максимальное значение $\delta_N \approx 43\%$ имело место на высоте около 200 км. Эту высоту можно считать высотой расположения атмосферного волновода. Эффективная толщина волновода (по уровню $0.5\delta_{N_{max}}$) составляла около 120 км, причем нижняя и верхняя «стенки» волновода располагались на высотах около 140 и 260 км соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Со стартом ракеты «Союз» 18 октября 2003 г. скорее всего связано колебание, имеющее период 110 мин. Оно появилось через 13—20 мин после старта. При $\Delta t'_1 = 10\ldots17$ мин и $R' \approx 2100$ км имеем $v' \approx 3.5\ldots2.1$ км/с. Здесь и далее, как и в работе [2], штрихи обозначают скорректированные значения. Более медленные процессы, обусловленные генерацией и распространением ВГВ, в этот день наблюдались с задержкой $\Delta t_2 \approx 50\ldots60$ мин на высотах 400—250 соответственно (см. рис. 1).

Эффекты от старта ракеты «Протон» 10 декабря 2003 г. существенно маскировались ВВ, которые имели место до старта. Изменения характера сигнала (сбой фазы колебания, изменения его амплитуды и периода) наблюдались через 15—20 и 60—70 мин после старта. Это видно по вариациям δP_s и δ_N на высотах 200—350 км (см. рис. 2). Если эти вариации обусловлены стартом, им соответствуют значения $v' = 2.9\ldots2.1$ км/с и 610...520 м/с. Такие скорости имеют соответственно ММГД- либо магнитоградиентные волны с $\omega \sim 0.001$ с⁻¹ и АГВ в F-области ионосферы [2, 6].

Перед стартом ракеты «Союз» 27 декабря 2003 г. имели место достаточно хаотические вариации δP_s и δ_N , максимальное значение последних обычно не превышало 10 %. Вскоре после старта возникли квазипериодические колебания с периодом $T \approx 65$ мин и относительной амплитудой, достигающей 43 %. По-видимому, они вызваны стартом. Момент

времени прихода ВВ определить сравнительно сложно из-за его наложения на хаотические вариации. Первая положительная полуволна возникла примерно через 16 мин после старта. Скорректированное время распространения ВВ составляло около 13 мин. При скорректированном [2—4] расстоянии от ракеты до места наблюдения $R' \approx 2100$ км ему соответствовала скорость $v' \approx 2.7$ км/с. Такую скорость при $\omega \sim 0.001$ с⁻¹ имеют ММГД- либо магнитоградиентные волны [1, 5].

Что касается ВГВ, то они в этом эксперименте четко не проявлялись. Возможно, эти волны вызвали увеличение амплитуды колебательного процесса на высотах 250—350 км (см. рис. 3), обусловленного приходом магнитных или ММГД волн. При этом время запаздывания возмущений составляло около 50 мин. При $\Delta t'_2 \approx 47$ мин имеем $v'_2 \approx 740$ м/с. Такая скорость действительно свойственна ВГВ на высотах F-области ионосферы.

ВЫВОДЫ

Полученные значения скоростей распространения ВВ, сопутствовавших стартам, хорошо согласуются с результатами других исследований [2—6, 8—10] и свидетельствуют в пользу того, что нами наблюдались ВВ, вызванные, скорее всего, стартами ракет.

1. Абурджания Г. Д., Хантадзе А. Г. Крупномасштабные электромагнитные волновые структуры в Е-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 2.—С. 245—251.
2. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартаами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 143—162.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старта ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 1.—С. 5—28.
4. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старта и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия.—1999.—4, № 3.—С. 227—246.
5. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982.
6. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
7. Таран В. И., Подьячий Ю. И., Максимов А. А. Долгопериодные возмущения ионосферы техногенного происхождения // Ионосфера. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. — Харьков: Основа, 1991.—вып. 1.—С. 32—41.

8. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова и А. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000.—640 с.
9. Noble S. T. A Large-Amplitude Traveling Ionospheric Disturbance Excited by Space Shuttle During Launch // J. Geophys. Res.—1990.—95.—P. 19037—19044.
10. Pokhotelov O. A. Parrot M., Fedorov E. N., et al. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources // Ann. Geophysicae.—1995.—13, N 11.—P. 1197—1210.

RADAR OBSERVATIONS OF WAVE-LIKE DISTURBANCES IN IONOSPHERE, ASSOCIATED WITH SPACE VEHICLE FLIGHTS

V. P. Burmaka, V. I. Taran, L. F. Chernogor

Wave-like disturbances (WLDs) associated with three launches of heavy rockets from the Baikonur cosmodrome are studied. The action of the rocket launches produces some variations in WLD features as well as in their spectral structure and in their amplitudes.

© А. В. Агапитов

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ Ps6 В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ПОСЛЕ МАГНИТНОЙ СУББУРИ

Ps6-пульсациі часто ідентифікуються як один із проявів фази відновлення геомагнітної суббури. На матеріалах вимірювань КА «Інтербол-1» і системи наземних магнітометричних станцій зроблено оцінку розмірів області низькочастотної активності, швидкості і напрямку переміщення цієї структури у магнітосфері. Показано залежність найінтенсивніших подій від максимуму збурення в D_{st} -індексі. Запропоновано можливий механізм генерації Ps6-хвиль під час вибухової фази суббури з наступним переміщенням хвильового пакету до Землі із магнітосферного хвоста.

В магнітосфері Землі наблюдається широкий спектр возмущень геомагнітного поля. Среди геомагнітних вариацій, амплітуди, фази и періоди яких змінюються случайним образом, виділяються діліннопериодичні колебання Pi и Pc УНЧ-диапазона, також называемі микропульсациями або геомагнітними пульсациями. Амплітуди цих вариацій змінюються від десятих долей нанотесла в умерених широтах до сотен нанотесла в високих. Pi — нерегулярні пульсации, кратковременні всплески колебань с широким нестационарним спектром; Pc — непрерывні пульсации квазисинусоїдальної форми и устойчивого режима колебань. Колебання можуть наблюдаватися довготривале время при почти постійних амплітудах и періодах. В окрему групу відделяють Ps6-пульсации з періодами 5—40 мін, з'явлення яких зазвичай асоціюється з фазою восстановлення магнітосферної суббури. Низькочастотна геомагнітна активність типу Ps6 проявляється в виде волнових пакетів, з тривалістю 30—60 мін. Сигнал проходить на одній частоті, але з дуже швидко змінюючоюся амплітудою. Ось звичайно наблюдаються 6—10 періодів.

Наблюдения подій типу Ps6 представлені в основному зображеннями наземних станцій, розташованими вище 60° геомагнітної широти [5—7]. Пространственная структура активної області для

околоземного пространства була исследована в работе [6] с помощью скординированных наблюдений КА GEOS-2, станций наземного базирования (расположенных на Скандинавском полуострове) и ионосферных зондов. В хвості магнітосфери наблюдені низькочастотні геомагнітні пульсации представлені окремими проектами. Це, наприклад, ISEE-1, 2 [9, 10], «Geotail» і частично AMPTE. В данній роботі представлені наблюдені низькочастотної волнової активності во внешній магнітосфері на основі зображень КА «Інтербол-1» (хвостової) і системи наземних магнітометрических станцій CANOPUS в 1995—2000 рр. Наблюдені Ps6 непосредственно в плазменному шарі дозволяють визначити залежність генерації волнового пакету від фази суббури.

Класичні методи спектрального аналізу при аналізі сигналів з великими змінами характеристиками не дають достатньо точних результатів. Це обумовлюється цілесообразністю застосування для аналізу спеціальних методик. Наприклад, в роботі [4] для дослідження спектральних властивостей подібних сигналів використовується параметрический метод максимальної ентропії. Розроблена в останні роки методика вейвлет-аналізу дозволяє проследити змінення не тільки амплітудних і частотних, але і фазових характеристик сильністі нестационарних сигналів [2]. Преимущество

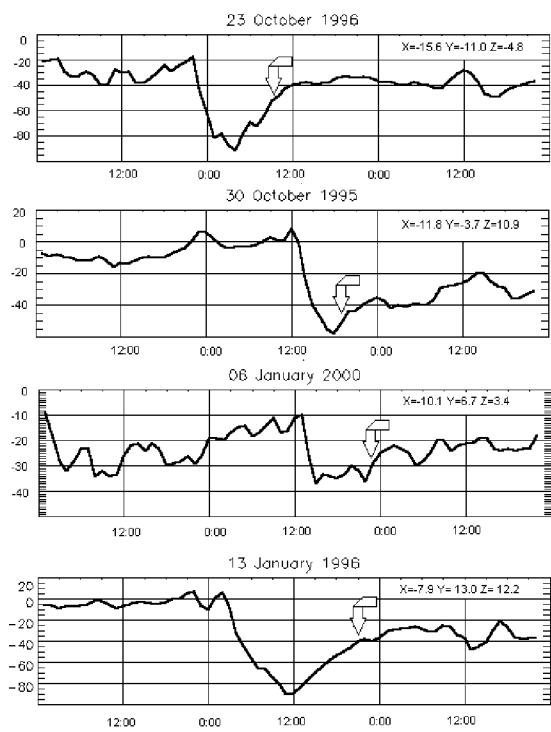


Рис. 1. D_{st} -индекс, демонстрирующий динамику развития магнитосферной суббури для 23.10.1996, 30.10.1995, 08.01.2000, 13.01.1996 гг. Стрелкой показан момент наблюдения Ps6 КА «Интербол-1». Приведены координаты КА «Интербол-1» в системе GSE

ва вейвлет-анализа проявляются при обработке результатов скоординированных наблюдений в различных точках пространства.

Наблюдения Ps6 и зависимость их генерации от геомагнитной активности. КА «Интербол-1» (хвостовой) проводил измерения в 1996—2000 гг., охватывая области плазменного слоя магнитосферы Земли КА с октября по январь. В работе использовались магнитометрические измерения магнитометра MIF-M и плазменного анализатора CORALL, установленных на КА «Интербол-1». Также использовались измерения геомагнитного поля системы наземных магнитометрических станций CANOPUS и значения D_{st} -индекса геомагнитной активности. Магнитометрические данные на начальном этапе обработки были приведены к локальному среднему путем отфильтровывания низкочастотных компонентов.

События типа Ps6 представляют собой монохроматический сигнал, модулированный сильно локализованной огибающей. Ps6-пульсации наблюдаются в основном в фазе восстановления геомагнитной суббури. На рис. 1 показана динамика развития геомагнитных возмущений. Стрелками показаны моменты наблюдения Ps6. Для исследования частотно-временных характеристик подобных сигналов целесообразно использовать непрерывный вейвлет-анализ. Есть широкий выбор вейвлетов с различны-

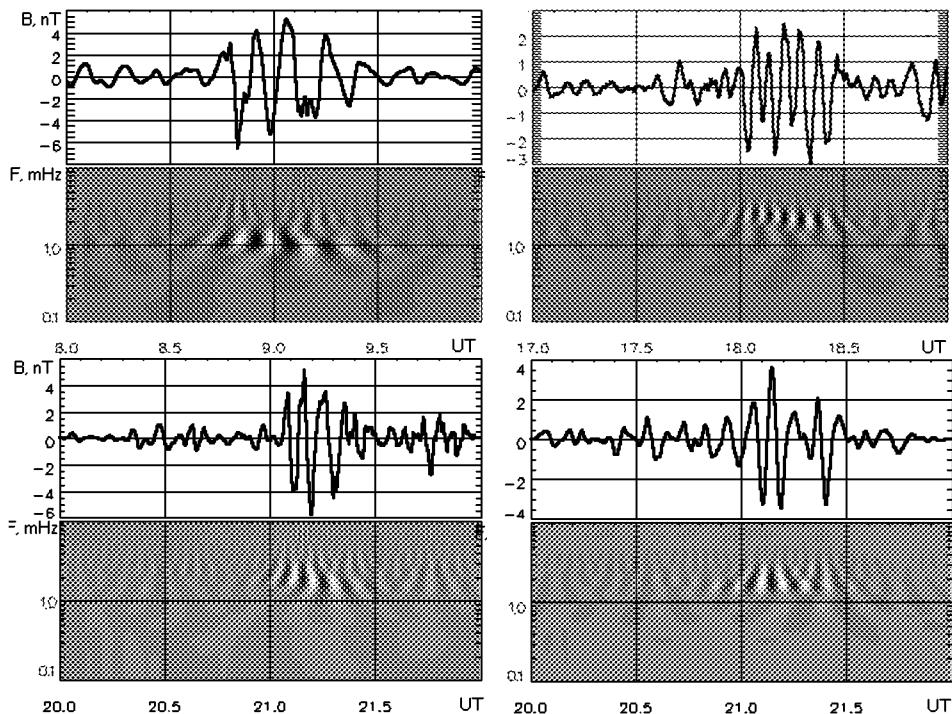


Рис. 2. Возмущения модуля магнитного поля и их вейвлет-образы для волновых событий типа Ps6: а — 20.10.1996 г., б — 30.10.1995 г., в — 08.01.2000 г., г — 13.01.1996 г.

ми характеристиками. Это позволяет подобрать вейвлет, наиболее подходящий для анализа различных сигналов. При исследовании сигналов типа Ps6 вейвлет-спектры с наилучшим контрастом были получены с использованием вейвлета Морле. Это связано с подобием формы сигнала Ps6 и материнского вейвлета.

Магнитные измерения и результаты вейвлет-преобразования четырех событий типа Ps6 приведены на рис. 2. Частота колебаний и длительность регистрации изменяется от 1 мГц и 60 мин для 23.10.1996 г. до 3 мГц и 30 мин для 30.10.1995 г. Колебания давления плазмы и давления магнитного поля проходят в противофазе. Это свидетельствует о наличии в колебаниях магнитозвукового компонента. Возмущения продольного и поперечного компонентов магнитного поля одного порядка. Таким образом, возмущение представляет собой связывание альвеновской и медленной магнитозвуковой волн. За счет противофазы амплитуда колебаний суммарного давления гораздо меньше, чем отдельных компонент. Также в противофазе с колебаниями магнитного поля наблюдаются всплески плотности энергетических пучков заряженных частиц.

Найти пространственные характеристики волновой структуры можно основываясь на одновременных измерениях в различных точках. Вдоль магнитной силовой линии возмущение распространяется с альвеновской скоростью. Для плазменного слоя альвеновская скорость составляет 600—1000 км/с. Это многое больше скорости поперечного смещения пакета. Была выполнена трассировка силовой линии геомагнитного поля из точки наблюдения КА. Для этого была использована модель Цыганенко 1996 г. (в дальнейшем T96) [8]. Координаты условной точки вхождения силовой линии в поверхность Земли $\varphi_N = 60.31^\circ$, $\lambda_E = 268.99^\circ$. Ближайшие к этой точке станции системы CANOPUS FCHU и ESKI (см. рис. 4).

Вейвлет-преобразование сигнала, зафиксированного станциями, представлено на рис. 3. Видно хорошо локализованное во времени возмущение магнитного поля, которое протекает одновременно с возмущением наблюдаемым на КА. На основе этих данных можно утверждать, что и на Земле, и в плазменном слое наблюдаются проявления одного и того же события. Частотно-временные характеристики сигнала, полученные с помощью вейвлет-анализа, дали возможность исследовать временную динамику развития возмущения на станциях и на КА и точно определить время начала регистрации и максимума возмущения на станциях.

Возмущение, аналогичное зарегистрированному на КА «Интербол-1», наблюдается с разной времен-

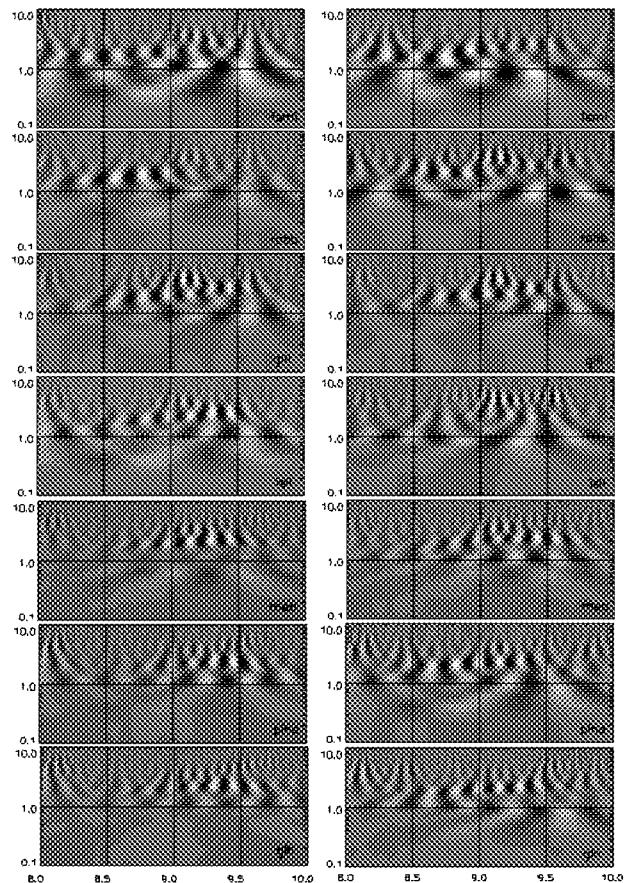


Рис. 3. Вейвлет-спектры X- и Z-компонентов магнитного поля. Измерения 23.10.1996 г. на магнитометрических станциях системы CANOPUS

ной задержкой на станциях FSMI, RABB, GILL, ISLL, PINA системы CANOPUS и станциях GLN и MEA (рис. 3). Эти станции расположены приблизительно вдоль геомагнитной широтной линии. Поперечные колебания магнитного поля происходят синфазно на всех станциях. От станции к станции изменяется со временем только огибающая сигнала. Это говорит о большой длине волны альвеновского компонента возмущения. Фаза продольного компонента изменяется в зависимости от положения станции. По данным наземных станций можно оценить размеры и скорость перемещения области возмущения в плазменном слое. Поперечные размеры порядка $(3...8)R_E$, скорость движения порядка 4—12 км/с. Таким образом, наблюдаемое явление можно объяснить перемещением волнового пакета со стабильной огибающей (солитоноподобная структура) в направлении, почти перпендикулярному к магнитному полю (рис. 5).

Возможность нелинейных солитонов огибающей в

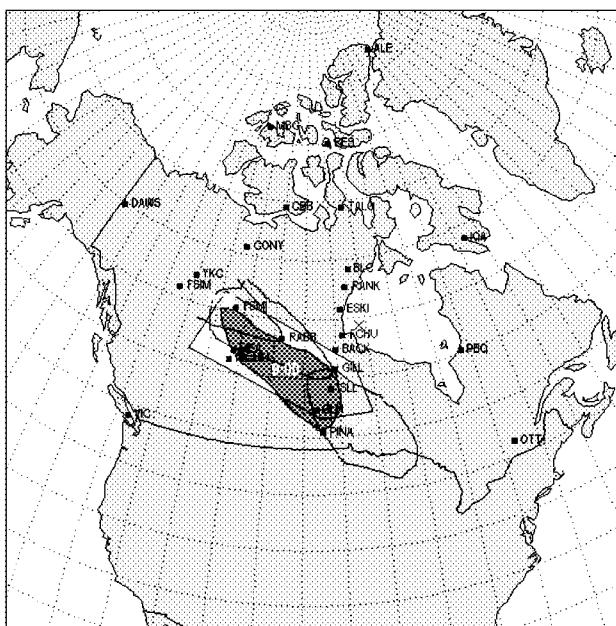


Рис. 4. Перемещение активной области по поверхности Земли (по материалам измерений системы CANOPUS и канадских магнитометрических станций). Направление перемещения показано стрелкой. Положения активной области в различные моменты времени различно закрашены контурами

плазменном слое магнитосфера Земли рассмотрена в работе [3]. Особенность солитона в том, что его амплитуда не является независимым параметром, а определенным образом связана с шириной пакета и частотой заполнения. В рамках модели плоского плазменного слоя параметры волновых пакетов связаны соотношением $b/B \approx \text{const}/(\tau f)$, где b — возмущение магнитного поля, B — фоновое значение магнитного поля, f — частота заполнения, много меньше гирочастоты ионов, τ — длительность сигнала. Для параметров, характерных для плазменного слоя, коэффициент пропорциональности порядка единицы [3].

Все приведенные события типа Ps6 были зафиксированы в фазе восстановления геомагнитной суббури. Механизм генерации Ps6-пульсаций обсуждается в выше цитированных работах, но единого мнения по этому поводу пока нет. Наиболее вероятным механизмом считается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца на фоне активных плазменных потоков в фазе восстановления суббури. В работе [7] высказывается предположение о генерации Ps6-возмущений во время взрывной фазы. Пропорциональность задержки наблюдения волнового пакета после максимума возмущения D_{st} -индекса от расстояния от предполагаемой точки мак-

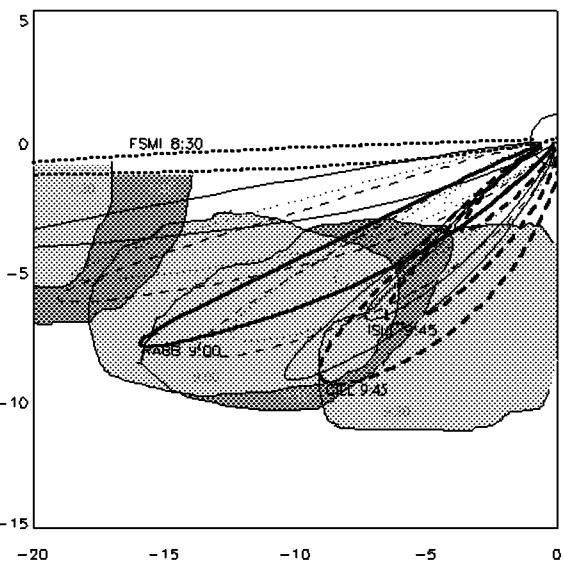


Рис. 5. Перемещение активной области в хвосте магнитосферы. Показана проекция активной области на плоскость XY системы GSE. Положение активной области показано различно закрашенными контурами. Показаны также силовые линии магнитного поля Земли в различные моменты времени

симального возмущения геомагнитного поля говорит в пользу этого предположения. События типа Ps6 фиксировались и при отсутствии сильных возмущений геомагнитного поля. Они в основном меньшей амплитуды (амплитуда составляет 5—10 % от фонового значения магнитного поля). Зафиксировано по крайней мере одно яркое событие типа Ps6 при отсутствии геомагнитной активности 02.01.1997 г. В этот и предыдущий дни D_{st} -индекс не опускался ниже -10 и не поднимался выше нуля. Это говорит о возможности альтернативного механизма генерации Ps6-структур.

Выводы. При анализе магнитометрических данных КА «Интербол-1» (хвостовой) за период 1995—2000 гг. были получены основные спектральные и физические особенности низкочастотной волновой активности в хвосте магнитосферы. Возмущение регистрируется в магнитометрических измерениях, измерениях плазменного давления и в потоках заряженных частиц. Амплитуда возмущения изменяется, модуль возмущенного магнитного поля достигает 15—40 % от невозмущенного уровня. Волновой пакет регистрируется в течение 30—90 мин. Ведущая частота колебаний 0.8—2.5 МГц. Колебания динамического давления плазмы и давления магнитного поля проходят в проиофазе. Как показала статистика наблюдений в плазменном слое магнитосферы Земли, именно возмущения такого типа

являются характерными возмущениями УНЧ-диапазона.

Характерные частоты волновых процессов в далеком магнитосферном хвосте меньше, чем во внутренней магнитосфере. Волна заполнения альвеновского типа с магнитозвуковой составляющей. С помощью координированных наблюдений магнитного поля в плазменном слое на борту КА и в магнитосопряженных точках на поверхности Земли с помощью системы магнитометрических станций были сделаны оценки размеров и скорости движения этих структур. Поперечные относительно магнитного поля размеры составляют $(3...6)R_E$. Активная область вытянута вдоль геомагнитной широты. Скорость движения поперек магнитного поля на расстоянии $(15...20)R_E$ в хвосте магнитосферы составляет 6—12 км/с. Скорость, судя по наземным наблюдениям, не является постоянной, а уменьшается при приближении к Земле до 2—4 км/с.

Наблюдения Ps6-возмущений в фазе восстановления геомагнитной суббури, через несколько часов после минимума D_{st} -индекса, возможно, связано только с тем, что наземными магнитометрами регистрируются волновые возмущения, переместившиеся из хвоста магнитосферы [7]. Об этом косвенно свидетельствует время и пространственные координаты точки наблюдения волнового пакета (рис. 1). Время регистрации пропорционально удалению сектора регистрации от точки максимального возмущения геомагнитного поля во время суббури. Так что, возможно, что при протекании взрывной фазы суббури часть энергии сбрасывается в виде волнового пакета типа Ps6, который перемещается к Земле, сохраняя свои характеристики. Параметры частотно-временных характеристик волновой структуры отвечают параметрам, полученным в работе [3] для магнитозвуковых солитонов огибающей в плазменном слое.

The CANOPUS instrument array constructed, maintained and operated by the Canadian Space Agency, provided the data used in this study. CANOPUS Scientist Mission Dr. Eric Donovan, CANOPUS Associate Mission Scientist Dr. Fokke Creutzberg Magnetic Observatory Definitive Data by (C) INTERMAGNET

1. Агапітов А. В., Верхоглядова О. П., Івченко В. М. Хвилі стиснення в магнітосфері Землі: інтерпретація спостережень

супутника «Інтербол-1» // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 64—70.

2. Вороб'єв В. І., Грибунін В. Г. Теорія і практика вейвлет-преобразування. — СПб, 1999.—180 с.
3. Гульельми А. В., Репін В. Н. МГД-солитони в хвості магнітосфери // Геомагнетизм і аерономія.—1978.—18, № 6.—С. 1089—1092.
4. Іванов В. В., Ротанова Н. М. Исследование структуры геомагнитных пульсаций типа Ps6 спектральными методами // Геомагнетизм и аэрономия.—1991.—31.—С. 625—629.
5. Connors M., Rostoker G., et al. Ps disturbances: relation to substorms and the auroral oval // Annal. Geophysicae.—2003.—P. 493—508.
6. Khrushchinsky A. A., Gustafsson, et al. The SAMBO-GEOS experiment: A Ps-6 event from ground-satellite observations // ESA Achievements of the Intern. Magnetospheric Study (IMS)—P. 625—627.
7. Steen A., Collis B. T., et al. Observations of a gradual transition between Ps6-activity with auroral torches and surge-like pulsations during strong geomagnetic disturbances // J. Geophys. Res.—1988.—93.—P. 8713—8733.
8. Tsyanenko N. A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause// J. Geophys. Res.—1995.—100A, N 4.—P. 5599—5612.
9. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves in the Outer Magnetosphere. 1. Statistical Study // J. Geophys. Res.—1994.—99A, N 1.
10. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves. 2. Case Study // J. Geophys. Res.—1994.—99A, N 1.—P. 241—252.

Ps6 PROPAGATION IN THE EARTH MAGNETOSPHERE TAIL AFTER MAGNETIC SUBSTORMS

A. V. Agapitov

The ULF geomagnetic pulsations in the Earth magnetosphere tail display themselves as localized in time wave pockets, with fill frequency in the range of Ps5 or Ps6. Therefore, it is expedient to apply wavelet analysis to these phenomena research. Wavelet-spectra of magnetometric and plasma measurements made by Interball-1 (tail) satellite demonstrate presence of magnetosonic component: oscillations of plasma pressure and magnetic field pressure are in phase opposition. Wave frequency is less than frequency of same events in the inner magnetosphere (so called field line resonance). Ps6 high-amplitude waves in outer magnetosphere have direct relation to substorm evolution. Wave amplitude depends on geomagnetic activity and magnetosphere region confirmed it. These structures are also observed by Earth-based magnetometer systems. CANOPUS magnetometers system data are used. Due to multipoint observations, it is possible to obtain spatial and temporary event parameters. Transversal to magnetic field size of wave pocket is about $(1—3)R_E$. It moves transverse to magnetic field with a speed of about 2—6 km/s.

© С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна МОН України

РЕЗУЛЬТАТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МЕЗОСФЕРЕ

Запропоновано новий метод дослідження хвильових збурень (ХЗ) у верхній мезосфері за даними середньочастотного радара часткових відбиттів. Приведені теоретичні основи методу і методика обробки, заснована на спектральному аналізі огибаючих зворотнорозсіяних сигналів. Представлено приклади результатів вимірювань. Проаналізовано залежність статистичних характеристик ХЗ від їхнього періоду, а також від рівня магнітної активності.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов в околоземной космической среде является одной из важнейших проблем геофизики, физики атмосферы и геокосмоса. Анализ многочисленных экспериментальных данных выявил регулярные и случайные вариации параметров (температуры, концентрации, химического состава и др.) нейтрального и заряженного компонентов околоземной плазмы. Определяющую роль в таких вариациях играют постоянно возникающие, распространяющиеся и диссирирующие волновые возмущения (ВВ). Особое внимание уделяется изучению волновых процессов в мезосфере (70—100 км), которая из-за сложности протекающих в ней физико-химических процессов является одной из наименее изученных областей геокосмоса. Поскольку пространственно-временное распределение всех источников ВВ достоверно не известно, экспериментальное исследование последних является актуальной задачей.

Для исследования мезосферы применяют целый ряд методов, основанных на анализе характеристик радиоволн и радиопомех различных диапазонов, оптического излучения, а также приземных электрических полей и вариаций магнитного поля [2, 7—9, 11]. При использовании радарных методов большое внимание уделяется вариациям горизонтальной скорости ветра $V(t)$ [6, 13]; иногда исследуются временные зависимости электронной концентрации $N(t)$. Нами предложен новый метод исследования ВВ, основанный на анализе статистических характеристик огибающих обратнорассеянных (ОР) сигналов, принимаемых среднечастотным (2-3 МГц) радаром. Технические характеристики радара приведены в работах [4, 10].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Теория обратного рассеяния радиоволн показывает, что средние квадратичные значения огибающих ОР-сигналов можно определить из выражений [5]

$$\overline{A_{o,x}^2} = C \frac{\overline{\Delta N^2}}{(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2} e^{-4K_{o,x}}.$$

Здесь индексы o , x относятся к обычновенной и необыкновенной составляющим и по возможности будут опускаться, A — огибающая, C — константа, ΔN — флюктуации концентрации электронов N , ν — эффективная частота соударений электронов с нейтралами, ω — циклическая частота радиоволны, ω_L — продольная составляющая гирочастоты электронов ($f_L = \omega_L/2\pi \approx 1.3$ МГц), K — интегральный коэффициент поглощения при однократном прохождении сигнала, чертой сверху обозначено усреднение по времени.

Распространение совокупности гармонических акусто-гравитационных волн (АГВ) в мезосфере сопровождается модуляцией электронной концентрации по закону:

$$N = N_0(1 + \delta_N),$$

$$\delta_N = \delta N / N_0 = \sum_j \delta_{Nm}(j) \cos \Phi(j),$$

$$\Phi(j) = \Omega(j)t - \mathbf{k}(j)\mathbf{r} + \Phi_0(j),$$

где Ω , \mathbf{k} , Φ_0 и δ_{Nm} — частота, волновой вектор, начальная фаза и относительная амплитуда АГВ; δN — абсолютные изменения электронной концентрации; j — индекс суммирования (в дальнейшем зависимость от j обычно будет опускаться). Здесь и далее нулевым индексом обозначено значение па-

раметра в отсутствие ВВ.

Найдем связь между ΔN^2 и N при прохождении АГВ. Зависимость ΔN^2 от времени описывается законом

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \overline{\Delta N^2} + D_a (\overline{\nabla \Delta N})^2 + \frac{\overline{\Delta N^2}}{t_N} = D_t (\nabla N)^2. \quad (1)$$

где D_a и D_t — коэффициенты амбиполярной и турбулентной диффузии соответственно, t_N — время становления N . Для приближенного решения (1) применим метод оценки производной. В этом случае можно записать

$$|\operatorname{grad} \Delta N| \approx \Delta N/l, \quad |\operatorname{grad} N| \approx N/L,$$

где l — характерный масштаб неоднородностей, L — характерный масштаб изменения N . Учитывая, что при гармонических вариациях $\partial/\partial t = \Omega = 2\pi/T$, где T — период, окончательно получим:

$$\overline{\Delta N^2} = \eta N^2, \quad \eta = \frac{D_t \tau}{L^2},$$

где τ — характерное время становления $\overline{\Delta N^2}$, которое в верхней мезосфере составляет 40—120 с.

Следовательно, можно записать

$$(\overline{\Delta N^2})^{1/2} = (\overline{\Delta N_0^2})^{1/2} \left(1 + \sum \delta_{Nm} \cos \Phi\right).$$

Частота соударений электронов с нейтралами пропорциональна давлению газа в мезосфере, которое изменяется по тому же закону, что и N . Поэтому

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \sum \delta_{Nm} \cos \Phi\right).$$

Показатель поглощения электромагнитных волн определяется из известного соотношения [12]

$$\kappa_{o,x} = \frac{e^2 N \nu}{2 \varepsilon_0 m \omega [(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2]}.$$

Основной вклад в интегральный коэффициент поглощения дают высоты больше 75—80 км, где $(\omega \pm \omega_L)^2 \gg \nu^2$. При этом выражение для $\kappa_{o,x}$ принимает вид

$$\kappa_{o,x} \approx \frac{e^2 N \nu}{2 \varepsilon_0 m \omega (\omega \pm \omega_L)^2}.$$

При прохождении АГВ выполняются соотношения

$$\kappa \approx \kappa_0 (1 + \sum \delta_{Nm} \cos \Phi)^2,$$

$$K \approx K_0 (1 + \sum \delta_{Nm} \cos \Phi)^2.$$

Исходя из изложенного, получаем

$$a \equiv (\overline{A^2})^{1/2} \approx a_0 \left(1 + \sum \delta_{Nm} \cos \Phi\right) \times$$

$$\times \exp \left[-2K_0 \left(2 \sum \delta_{Nm} \cos \Phi + \left(\sum \delta_{Nm} \cos \Phi \right)^2 \right) \right],$$

или

$$\delta_{lna} = \ln(a/a_0) = \ln \left(1 + \sum \delta_{Nm} \cos \Phi \right) - 2K_0 \left[2 \sum \delta_{Nm} \cos \Phi + \left(\sum \delta_{Nm} \cos \Phi \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что имеет место нелинейная зависимость δ_{lna} от δ_{Nm} . Можно показать, что при $K_0 \geq 1$ выражение для δ_{lna} принимает вид

$$\delta_{lna} \approx B_0 + \sum_j B_1(j) \cos \Phi(j) - \sum_j B_2(j) \cos 2\Phi(j) - \sum_{k>j} B_{11}(k, j) [\cos(\Phi(k) + \Phi(j)) + \cos(\Phi(k) - \Phi(j))],$$

где

$$B_0 = (1 + 4K_0) \sum \delta_{Nm} / 4,$$

$$B_1 = (1 - 4K_0) \delta_{Nm}, \quad B_2 = (1 + 4K_0) \delta_{Nm}^2 / 4,$$

$$B_{11}(k, j) = (1 + 4K_0) \delta_{Nm}(k) \delta_{Nm}(j) / 2.$$

Таким образом, основной вклад в δ_{lna} дают постоянная составляющая, колебания на основной и удвоенной частотах, а также на первых комбинационных частотах.

Запишем отношения B_2 и B_{11} к B_1 :

$$\frac{B_2(j)}{B_1(j)} = \frac{1 + 4K_0}{4(1 - 4K_0)} \delta_{Nm}(j),$$

$$\frac{B_{11}(k, j)}{B_1(j)} = \frac{1 + 4K_0}{2(1 - 4K_0)} \delta_{Nm}(k).$$

В частности, при $K_0 = 1$ получаем

$$B_2/B_1 = -(5/12) \delta_{Nm},$$

$$B_{11}/B_1 = -(5/6) \delta_{Nm}.$$

Как видно из экспериментальных данных (см. ниже), на высотах 85—90 км в основном $\delta_{Nm} \leq 0.2$ и $|B_2/B_1| \leq 0.08$, $|B_{11}/B_1| \leq 0.17$. Поэтому для верхней мезосферы справедливо выражение

$$\delta_{lna} \approx B_0 + (1 - 4K_0) \sum \delta_{Nm} \cos \Phi. \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что для нахождения амплитуд колебаний, необходимо применение спектрального анализа к временным вариациям δ_{lna} .

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Методика выявления ВВ состоит из нескольких этапов. На первом этапе из массивов огибающих A и A_n (индекс n относится к радиопомехе) опреде-

ляются значения

$$a_1 = [(\bar{A^2})_{m1} - (\bar{A_n^2})_{m1}]^{1/2}$$

и

$$a_{n1} = (\bar{A_n^2})_{m1}^{1/2}.$$

Затем методом скользящего среднего с шагом Δt вычисляются тренды первичных последовательностей

$$a_2 = [(\bar{A^2})_{m2} - (\bar{A_n^2})_{m2}]^{1/2}$$

и

$$a_{n2} = (\bar{A_n^2})_{m2}^{1/2}.$$

(Здесь и далее индексы m_1 и m_2 показывают интервал усреднения в минутах.) Наконец, из полученных величин формируются массивы $\delta_{lna} = \ln(a_1/a_2)$, которые являются исходными для получения оценок периодов и амплитуд ВВ.

При $m_1 = 1$, $m_2 = 120$, $K = 1-10$ и отношении сигнал/помеха $q = 3-30$ относительные погрешности определения амплитуд относительной электронной концентрации не превышают 30 % при $\delta_{Nm} = 0.07-0.01$ соответственно.

Анализ экспериментальных данных показывает, что продолжительность гармонических ВВ обычно составляет всего несколько периодов (минимум два-три). Поэтому для их выявления целесообразно применять динамическое оконное спектральное оценивание. Для нахождения амплитуд колебаний было выбрано дискретное преобразование Фурье вида

$$X(T, t) = \frac{2\gamma\Delta t}{t_w} \sum_{t_1=t-w/2}^{t+t_w/2} \delta_{lna}(t_1) w(t_1) \exp\left(-i \frac{2\pi t_1}{T}\right),$$

$$S(T, t) = \sqrt{\text{Re}[X(T, t)]^2 + \text{Im}[X(T, t)]^2},$$

где S — динамический спектр амплитуд, t — время, соответствующее середине интервала обработки, t_w — ширина интервала, Δt — шаг по времени, $w(t_1) = 0.54 + 0.46 \cos[2\pi(t_1 - t)/t_w]$ — окно Хэмминга, $\gamma \approx 1.6$ — нормировочный множитель, i — мнимая единица.

Решение о наличии либо отсутствии колебаний с данным периодом принималось с использованием метода множественной корреляции. Как показано в работе [1], значение амплитуды с вероятностью $1 - \alpha$ не случайно отлично от нуля, если выполняется условие

$$S > 2\sigma \sqrt{\frac{F_{2,M-3}(\alpha)}{2F_{2,M-3}(\alpha) + M - 3}},$$

где σ — стандартное отклонение величины δ_{lna} , $M = t_w/\Delta t$ — количество значений δ_{lna} на интервале обработки, $F_{2,M-3}(\alpha)$ есть 100 α %-я точка распределения Фишера со степенями свободы $p_1 = 2$, $p_2 = M - 3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ

Продолжительные (не менее 5 ч) измерения огибающих ОР-сигналов проводились в 2000—2003 гг. в магнитоспокойные и магнитовозмущенные дни (индекс $K_p = 0-7$). Всего было обработано более 120 ч регистраций, а с учетом того, что измерения выполнялись для одной—трех высот, суммарная продолжительность наблюдений составила более 250 ч.

Примеры временных зависимостей δ_{lna} для четырех дней приведены на рис. 1. Для них $\Delta t = 1$ мин, $m_1 = 1$, $m_2 = 120$. Отношение сигнал/помеха превышало 5 дБ ($q \geq 3$). Видны квазипериодические колебания, имеющие продолжительность не менее двух-трех периодов. Абсолютные значения δ_{lna} в основном лежали в пределах от 0 до 0.7. В отдельных случаях они достигали значений 1—1.5.

На рис. 2 представлены примеры динамических спектров амплитуд δ_{Nm} для тех же дней, что и на рис. 1. Здесь результаты представлены на плоскости времени — период в виде оттенков серого цвета,

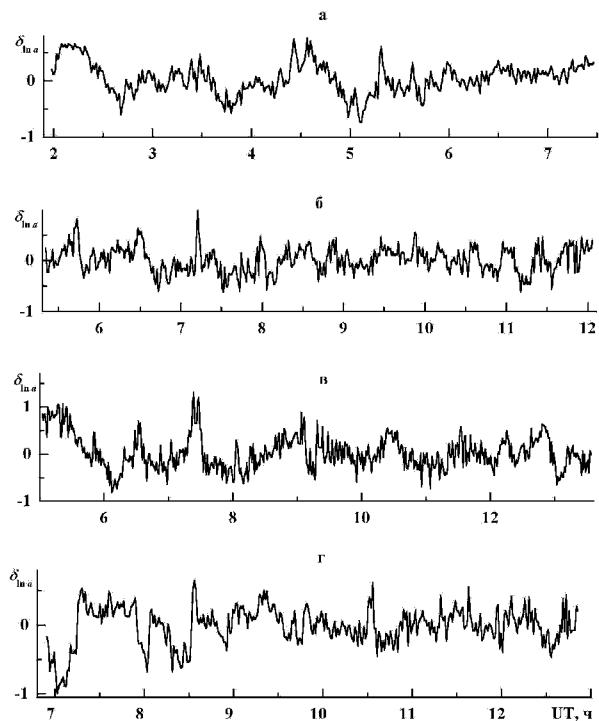


Рис. 1. Примеры временных зависимостей δ_{Nm} на высотах 85—95 км для 15.05.2002 г. (а), 26.06.2002 г. (б), 03.10.2002 г. (в) и 22.01.2003 г. (г)

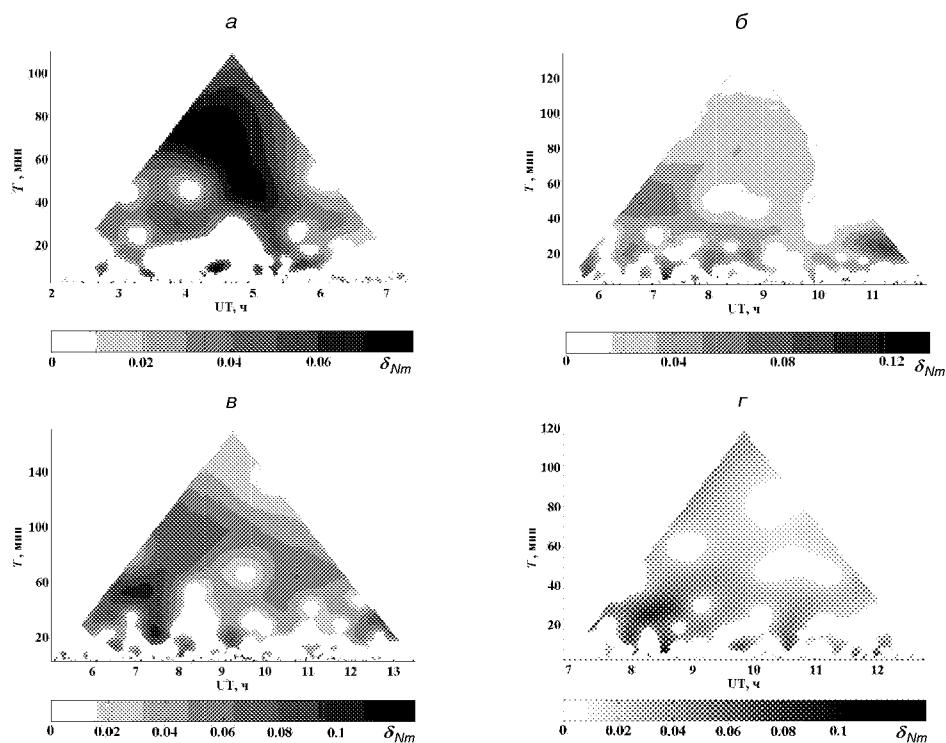


Рис. 2. Примеры динамических спектров амплитуд относительных флюктуаций электронной концентрации на высотах 85—95 км для 15.05.2002 г. (а), 26.06.2002 г. (б), 03.10.2002 г. (в), 22.01.2003 г. (г). Здесь T — период колебания, δ_{Nm} — его амплитуда

причем большим значениям δ_{Nm} соответствует более темный цвет. Как видно, обусловленные атмосферными волнами колебательные процессы имели место на протяжении всего времени наблюдения. Максимальное значение их амплитуд составляло 8—15 %. Анализ результатов показал, что эти колебания условно можно разделить на следующих два типа.

1. Колебания с периодами 30—120 мин. Они наблюдались практически всегда.

2. Колебания с периодами 5—25 мин. Они наблюдались в отдельные временные интервалы, причем имели место как непрерывный спектр колебаний, так и отдельные периоды.

Для выявления статистических закономерностей был также проведен статистический анализ амплитуд и длительностей колебаний для дней с различным уровнем магнитной активности. При этом дни наблюдений классифицировались как слабовозмущенные ($\sum K_p \leq 20$), возмущенные ($20 < \sum K_p < 35$) и сильновозмущенные ($\sum K_p \geq 35$). На рис. 3 изображены примеры гистограмм амплитуд колебаний и зависимостей их средней суммарной относительной длительности для дней, различающихся магнитной активностью. Из рисунка видно, что

закон распределения амплитуд колебаний близок к закону Рэлея. Их средние значения увеличиваются с ростом магнитной активности. Суммарная относительная продолжительность колебаний первого типа слабо зависит от их периода. Долгопериодические колебания (30—120 мин) имеют значительную относительную продолжительность ν_T , достигающую 60—90 % от времени наблюдения. При этом выделяются максимумы продолжительностей колебаний с периодами 30, 40, 60 мин, которые наиболее выражены в сильновозмущенные дни. Прослеживается также тенденция к увеличению ν_T при росте магнитной активности. Для колебаний второго типа характерна близкая к линейной зависимость ν_T от периода, причем их суммарная относительная продолжительность не превышает 20—45 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод выявления ВВ обладает достаточно хорошим (около 3 км) высотным разрешением, чем он выгодно отличается от радарных методов метеорных отражений, оптических методов

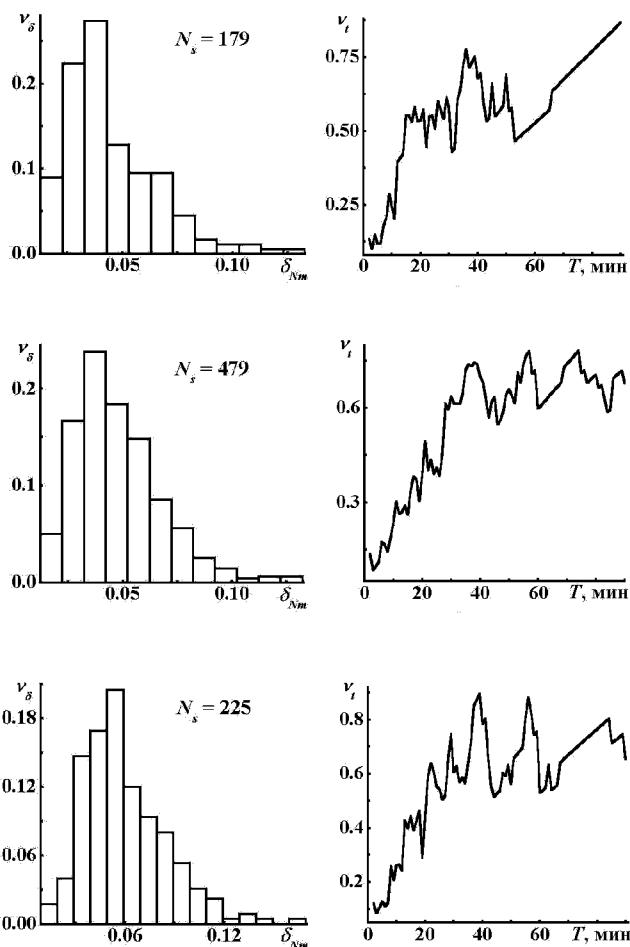


Рис. 3. Примеры гистограмм амплитуд относительных флюктуаций электронной концентрации (а), а также зависимость средней суммарной относительной длительности колебаний от их периода (б) на высотах 85–95 км для слабовозмущенных (верхняя панель), возмущенных (средняя панель) и сильновозмущенных (нижняя панель) дней; N_s — объем выборки

и методов, основанных на анализе характеристик радиопомех [2, 6–9, 11]. Перечисленные методы основываются на приеме радиосигналов, отраженных или рассеянных неоднородными слоями показателя преломления среды, высота которых изменяется под действием внешних факторов. Кроме того, метод не требует, как, например, метод некогерентного рассеяния [3], дорогостоящего оборудования и сложных антенных систем, хотя и не позволяет проводить комплексную диагностику плазмы. К достоинствам метода также следует отнести слабую зависимость его работоспособности от явлений в нижней атмосфере (облачности, осадков). Недостатками метода являются возможность применения лишь в дневное время и довольно

узкий диапазон исследуемых высот ($z = 75$ – 95 км), когда возможен уверенный прием ОР сигналов с $q \geq 3$ и интегральный коэффициент поглощения составляет $K_o \approx 1$ и $K_x \approx 6$.

Выявленные при помощи данного метода колебания первого типа, вероятно, связаны с прохождением гравитационных волн, генерируемых в высоких широтах. Источниками этих волн являются мощные электрические поля и высокоэнергичные частицы, высыпающиеся из радиационных поясов при вариациях космической погоды. Однако они могут также генерироваться при прохождении солнечного терминатора, за счет неравномерного прогревания подстилающей поверхности, а некоторые из них могут являться собственными колебаниями Земли и атмосферы. Колебания второго типа, по-видимому, вызваны локальными источниками, расположеными в нижней атмосфере. Ими могут быть ветровые сдвиги, турбулентные вихри, локальные особенности рельефа, прохождение атмосферных фронтов, а также антропогенные воздействия.

Близость закона распределения амплитуд колебаний к закону Рэлея указывает на большое количество факторов, оказывающих совместное влияние на генерацию и распространение ВВ. Обнаруженное увеличение средних амплитуд колебаний с ростом магнитной активности, скорее всего, указывает на непосредственную связь наблюдаемых колебаний с процессами в высоких широтах, интенсивность которых значительно усиливается во время магнитных возмущений. В целом периоды выявленных колебаний и их длительность в мезосфере подобны наблюдаемым в термосфере на высотах 125–500 км и выше [3], что указывает на большие (порядка 100 км) вертикальные масштабы ВВ и подтверждает тесную взаимосвязь верхней мезосфера с термосферой. Взаимодействие между последними осуществляется, в частности, при помощи ВВ.

выводы

1. Предложен новый метод исследования ВВ в мезосфере. Метод основан на статистическом и спектральном анализе огибающих радиосигналов, обратно рассеянных неоднородностями электронной концентрации, и применим в дневное время на высотах 75–95 км.

2. По экспериментальным данным получены амплитуды вызванных ВВ колебаний относительной электронной концентрации в дни, соответствующие различным сезонам и уровням магнитной активности. Показано, что относительные амплитуды ВВ в верхней мезосфере в дневное время не превышают

15—25 %. Обнаружены два типа колебаний с периодами 5—25 мин и 30—120 мин, имеющие, по-видимому, различные источники происхождения.

3. Проведен статистический анализ параметров ВВ. Проиллюстрировано, что закон распределения амплитуд колебаний близок к закону Рэлея, что, вероятно, вызвано большим количеством источников ВВ и изменяющимися условиями распространения. Обнаружена тенденция к увеличению средних амплитуд колебаний и их суммарной относительной продолжительности с ростом магнитной активности. Показано, что ВВ в зависимости от периода наблюдаются в течение 20—90 % времени измерений.

Авторы благодарят А. И. Гритчина, В. А. Подноса за организацию и проведение измерений, а также К. П. Гармаша и В. Г. Сомова за техническое обслуживание и модернизацию радара.

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. — М.: Мир, 1976.—755 с.
2. Аушев В. М., Ашкалиев Я. Ф., Винс Р. Х. и др. Спектр атмосферных гравитационных волн в мезосфере и термосфере // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42.—С. 560—568.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9.—С. 5—28.
4. Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1988.—№ 318.—С. 21—24.
5. Иванов В. А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений. — Йошкар-Ола: ВИНТИИ, 1985.—196 с.
6. Кащеев Б. Л., Олейников А. И. Пространственно-временная структура внутренних гравитационных волн в области мезопаузы — нижней термосфера по радиолокации метеоров // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41.—С. 382—387.

7. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Дружин Г. И., Капустина О. В. Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия.—2004.—44.—С. 245—253.
8. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В. и др. Вариации атмосферных помех на Камчатке во время солнечных вспышек и геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41.—С. 836—840.
9. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В. и др. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—43.—С. 422—428.
10. Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 76—80.
11. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9.—С. 130—151.
12. Budden K. G. The propagation of radio waves: The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere. — Cambridge, 1988.—669 p.
13. Manson A. H., Meek C. E., Koshyk J., et al. Gravity wave activity and dynamical effects in the middle atmosphere (60—90 km): observations from an MF/MLT radar network, and results from the Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM) // J. Atm. Sol-Terr. Phys.—2002.—64.—Р. 65—90.

SOME RESULTS OF INVESTIGATION OF WAVE DISTURBANCES IN THE MESOSPHERE

S. V. Panasenko, L. F. Chernogor

We developed a new method for the study of wave disturbances (WD) in the upper mesosphere with the use of Kharkiv MF radar data. We present the theoretical foundations of the method and data processing procedure based on the spectral analysis of the envelope amplitudes of the backscattered radio signals. The method is illustrated by a typical set of measurements, and the dependences of the WD statistical features on their period as well as on the level of magnetic activity are analysed.

© Ю. П. Ладиков-Роев, А. А. Логинов, Н. В. Маслова, О. К. Черемных

Інститут космічних досліджень НАНУ і НКАУ, Київ

МОДЕЛЬ СПИКУЛЫ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Розглянуто стаціонарну модель спікули з урахуванням реальних граничних умов на бічній поверхні. Знайдено залежності від висоти викиду його основних параметрів: вертикальної та азимутальної швидкостей, магнітного поля, густини. Оцінено тривалість життя спікули.

Введение. Спікулы являются одним из фундаментальных компонентов солнечной хромосфера. Они имеют вид плазменных струй и наблюдаются на лимбе Солнца в линии H_{α} и других хромосферных спектральных линиях в течение более чем 100 лет. Спікулы имеют поперечный размер, сравнимый с пределом разрешения инструментов, которые до настоящего времени применялись для их изучения. Следовательно, многие из свойств спікул являются сомнительными и часто находятся в противоречии с наблюдательными данными. Конечно, такая неопределенность усложняет теоретическую задачу их моделирования.

Спікулы на диске Солнца (рис. 1) группируются на границах супергранул, где средняя напряженность магнитного поля увеличена. Среднее значение наклона спікул к вертикали близко к 30° , и в любой момент времени на поверхности Солнца есть 60000–70000 спікул. Они имеют направленный вверх поток массы, в 100 раз больший, чем у солнечного ветра, и поэтому играют важную роль при рассмотрении баланса массы и энергии в солнечной атмосфере.

Наблюданое распределение величин их высот достаточно широко — в пределах от 6500 до 13000 км для большой части спікул. Большинство спікул имеет ширину 300–1500 км и время жизни 1–10 мин. Направленные вверх скорости близки к 25–30 км/с. Температура и плотность газа в спікуле ($\sim 10^4$ К и 10^{16} м⁻³) существенно отличаются



Рис. 1. Изображение участка поверхности Солнца на лимбе размером $120'' \times 39''$ в H_{α} 75 пм [1]

от соответствующих величин в окружающей солнечной короне (10^6 К и 10^{14} м⁻³). Вариации их плотности и температур с высотой относительно постоянны. Пока неясно, являются ли направленные вверх скоростные профили спікул баллистическими или постоянными.

Окончательная судьба этих структур неизвестна: наблюдается как внезапное опускание спікулы, следующее за фазой роста, так и однородное исчезновение спікул по всей их длине. Скорее всего, некоторые из них постепенно изменяют силу сигнала в хромосферных спектральных линиях. В любом случае разумно считать, что большинство материала спікул должно возвратиться на поверхность Солнца, так как поток массы, направленный наружу, много больше, чем масса солнечного ветра [2, 3].

В связи с большой неопределенностью наблюдаемых характеристик спікул и их многообразием было предложено много математических моделей. Однако, как правило, эти модели приходят в противоречие с наблюдаемыми свойствами спікул или не описывают все явления, сопровождающие их динамику. Предложенные к настоящему времени модели спікул можно условно разделить на два основных класса:

- баллистические модели, которые описывают спікулу как некоторую струю, выбрасываемую из недр хромосферы путем создания вертикального импульса скорости или давления в магнитных силовых трубках. Эти модели приходят в противоречие с наблюдаемыми высотами спікул.
- класс моделей, связанный с созданием вертикального импульса благодаря градиенту магнитного азимутального поля, приводящего к ударным волнам, уплотняющим газ внутри силовых трубок. Однако тогда остается непонятным, почему газ в спікулах менее горячий, чем газ короны.

Следует заметить, что все модели рассматривают

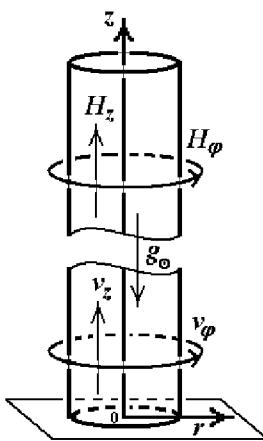


Рис. 2. Геометрия модели

спикулу как струю плазмы, заключенную внутри жесткой магнитной силовой трубы, без учета реальных граничных условий на боковой границе спикул. Кроме того, большинство моделей линейные. Между тем наблюдаются спикулы, которые гаснут одновременно по всей высоте, что можно объяснить прогреванием спикулы со стороны окружающего газа короны.

Эти обстоятельства побудили нас рассмотреть нелинейную стационарную модель спикулы с реальными граничными условиями, чтобы оценить величины начальных (граничных) параметров, которые бы соответствовали наблюдаемым скоростям, плотности, температуре, высоте и времени жизни спикулы.

Стационарная вихревая модель спикулы. Предлагаемая модель базируется на следующих предположениях:

— спикула состоит из «холодного» плотного ядра радиуса a и окружающей «горячей» корональной плазмы;

— спикула имеет цилиндрическую форму. Ее длина L значительно больше радиуса a (рис. 2);

— вихри магнитного поля и скорости ($\text{rot} \mathbf{H}$ и $\text{rot} \mathbf{v}$) однородны по сечению спикулы;

— для движения плазмы внутри спикулы характерны осесимметричность ($\partial/\partial\varphi = 0$) и стационарность ($\partial/\partial t = 0$). Движение происходит так, что радиальных составляющих скорости и магнитного поля нет: $v_r = 0$, $H_r = 0$.

При сделанных предположениях уравнения магнитной гидродинамики принимают вид:

— уравнение магнитной индукции

$$\frac{\partial}{\partial z} (H_z v_\varphi - H_\varphi v_z) = 0; \quad (1)$$

— уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0; \quad (2)$$

— уравнения движения

$$-\rho \frac{v_\varphi^2}{r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \mu_0 \frac{H_z^2 + H_\varphi^2}{2} \right) - \mu_0 \frac{H_\varphi^2}{r}, \quad (3)$$

$$\rho v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} = \mu_0 H_z \frac{\partial H_\varphi}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(p + \mu_0 \frac{H_z^2 + H_\varphi^2}{2} \right) + \mu_0 H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \rho g_\odot. \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{v} = (0, v_\varphi, v_z)$ и $\mathbf{H} = (0, H_\varphi, H_z)$ — векторы скорости и магнитного поля, μ_0 — магнитная проницаемость, ρ — плотность, g_\odot — ускорение свободного падения на поверхности Солнца, p — давление газа, r, φ, z — цилиндрическая система координат.

Уравнения (1)–(5) необходимо также дополнить уравнениями Максвелла, которые ввиду их очевидности мы опускаем.

Из выражений для вихрей магнитного поля и скорости и предположения об их однородности по сечению спикулы следует, что:

$$v_z = v_z^0 \Omega_1(z) (1 - r/a) \quad \text{при } r < a,$$

$$v_z = 0 \quad \text{при } r \geq a,$$

$$H_z = H_z^0 (1 - r/a) \quad \text{при } r \leq a,$$

$$H_z = 0 \quad \text{при } r > a,$$

$$H_\varphi = H_\varphi^0 J(z) r/a \quad \text{при } r \leq a,$$

$$H_\varphi = H_\varphi^0 J(z) a/r \quad \text{при } r > a, \quad (6)$$

$$v_\varphi = v_\varphi^0 \Omega(z) r/a \quad \text{при } r \leq a,$$

$$v_\varphi = v_\varphi^0 \Omega(z) a/r \quad \text{при } r > a,$$

$$\rho = \rho_0 R(z) [1 - (1 - \rho_1/\rho_0)r/a],$$

где ρ_1 — плотность плазмы вне спикулы, ρ_0 — внутри магнитной трубы, $\Omega(z)$, $\Omega_1(z)$, $J(z)$, $R(z)$ — искомые функции от z . При этом на поверхности спикулы нет скачка полного давления:

$$\left. \left(p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \right|_{r=a-0}^{r=a+0} = 0. \quad (7)$$

Из уравнений (1), (5) и (6) и граничных условий на «дне» спикулы $\Omega(0) = \Omega_1(0) = J(0) = 1$ получаем

$$R(z) = \frac{1}{\Omega_1(z)}, \quad J(z) = \frac{\xi - 1}{\xi - \Omega_1(z)},$$

$$\Omega(z) = \sigma J(z) + (1 - \sigma), \quad (8)$$

где параметр $\xi = \mu_0 (H_z^0)^2 / [\rho_0 (v_z^0)^2]$ характеризует отношение энергии продольного магнитного поля в

трубке к начальной кинетической энергии продольного движения, $\sigma = \mu_0 H_z^0 H_\phi^0 / [\rho_0 v_z^0 v_\phi^0]$ — отношение магнитного напряжения к кинематическому напряжению.

Таким образом, искомые величины $J(z)$, $\Omega(z)$, $R(z)$ определены через относительную вертикальную скорость $\Omega_1(z)$ на оси цилиндра, т. е. магнитное азимутальное поле, азимутальная скорость и плотность определяются через вертикальную скорость и начальные параметры.

Усреднив оставшиеся уравнения (3) и (4) по сечению спикулы и исключив из них давление, получаем зависимость высоты спикулы z от ее относительной вертикальной скорости $\Omega_1(z)$ и граничных значений магнитного поля H_z^0 , H_ϕ^0 и скорости v_z^0 , v_ϕ^0 :

$$\begin{aligned} z = & \frac{b_1}{b_4} \left\{ - \left(\frac{\sigma(\xi - 1)}{\xi - x} + 1 - \sigma \right)^2 + \right. \\ & + 1 - \frac{1}{2} \frac{b_3(x^2 - 1)}{b_1} - \frac{C\gamma(x^{1-\gamma} - 1)}{2(\gamma - 1)} - \\ & - \sigma^2 \frac{(\xi - 1)^2}{\xi^2} \left[\ln \left(\frac{\xi - x}{x(\xi - 1)} \right) - \frac{x}{\xi - x} + \frac{1}{\xi - 1} \right] - \\ & - \frac{2\sigma(\xi - 1)(1 - \sigma)}{\xi} \ln \left| \frac{\xi - x}{x(\xi - 1)} \right| + (1 - \sigma)^2 \ln |x| + \\ & \left. + \frac{b_2}{b_1} \left[\frac{x(\xi - 1)^2}{(\xi - x)^2} - 1 - \frac{(\xi - 1)(x - 1)}{(\xi - x)} \right] \right\}. \quad (9) \end{aligned}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} x = & \Omega_1(z), b_1 = \rho_0(v_\phi^0)^2 \left(\frac{1}{120} - \frac{1}{15} \frac{\rho_1}{\rho_0} \right), \quad b_2 = \frac{1}{8} \frac{(B_\phi^0)^2}{\mu_0}, \\ b_3 = & \rho_0(v_z^0)^2 \left(\frac{23}{60} - \frac{1}{30} \frac{\rho_1}{\rho_0} \right), \quad b_4 = \rho_0 g_\odot \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{3} \frac{\rho_1}{\rho_0} \right). \end{aligned}$$

Решение уравнения вблизи резонанса. Асимптотическое решение уравнения (9) вблизи резонанса $x = \xi$ имеет вид

$$z \approx \frac{7}{10} \frac{(B_z^0)^2 (B_\phi^0)^2}{\mu_0^2 \rho_0^2 (v_z^0)^2} \frac{(\xi - 1)^2}{g_\odot (\xi - x)^2} \quad (10)$$

и представлено на рис. 3. Фигурирующий в формуле (10) параметр ξ изменяется в зависимости от величин магнитного поля в силовой трубке и скорости выброса. Видно, что вблизи резонанса вертикальная скорость x очень мало изменяется с высотой, откуда следует малое изменение магнитных полей, азимутальной скорости и плотности плазмы с высотой спикулы.

Легко оценить время прогрева спикулы до температуры окружающей короны (после чего спикула становится ненаблюдаемой) по формуле $t_0 \approx a^2/\chi$,

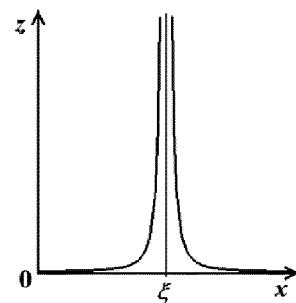


Рис. 3. Графический вид решения уравнения (9) вблизи резонанса

где a — радиус спикулы, χ — температуропроводность поперек магнитного поля. Подставляя в эту формулу стандартные характеристики спикулы, получаем, что время жизни спикулы может составлять 1—45 мин в зависимости от величины магнитного поля и радиуса спикулы, что согласуется с наблюдательными данными.

Выводы. Рассмотрена стационарная математическая модель спикулы с учетом реальных граничных условий на боковой поверхности. Показано, что:

— наблюдаемые высоты спикулы могут быть объяснены за счет резонанса, который возникает, когда величина безразмерного значения вертикальной скорости $x = v_z/v_z^0$ приближается к отношению квадрата альвеновской скорости к квадрату скорости выброса;

— продольная и азимутальная скорости, плотность плазмы в спикуле, азимутальное магнитное поле с высотой спикулы изменяются незначительно;

— время жизни спикулы определяется температуропроводностью поперек магнитного поля.

- Christopoulou E. B., Georgakilas A. A., Koutchmi S. Fine structure of the magnetic chromosphere: near-limb imaging, data processing and analysis of spicules and mottless // Solar Phys.—2001.—199, N 1.—P. 61—80.
- Sterling A. C. Solar spicules: A review of recent model and targets of future observation // Solar Phys.—2000.—196, N 1.—P. 79—111.
- Whitelam S., Ashbourn J. M. A., Bingham R., et al. Alfvén wave heating and acceleration of plasmas in the solar transition region producing jet-like eruptive activity // Solar Phys.—2002.—211.—P. 199—219.

A MODEL OF A SPICULE IN THE SOLAR CORONA

Yu. P. Ladikov-Roev, A. A. Loginov,
N. V. Maslova, O. K. Cherevnykh

A stationary model of spicule is considered taking into account the real conditions on the boundaries. We found the relationships between the height of eruption and other main parameters, namely, vertical and azimuthal velocity, value of magnetic field, and density. The existence time of a spicule is estimated.

© Ю. П. Ладиков-Роев, А. А. Линник,
Н. Н. Сальников, О. К. Черемных

Інститут космічних досліджень НАНУ і НКАУ, Київ

МАГНИТНО-ВИХРЕВАЯ МОДЕЛЬ ВЫБРОСОВ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ

Запропоновано модель викидів корональних мас (ВКМ) Сонця у формі магнітно-вихрової структури. Модель дозволила пояснити ефекти розширення ВКМ, їхню стійкість та можливість руху не по нормальні до поверхні Сонця, які не знаходили пояснення у рамках раніше запропонованих моделей. Розрахунки показали добре узгодження моделі із даними спостережень ВКМ.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее мощные изменения в солнечной короне происходят во время выбросов корональной массы, в ходе которых солнечное вещество из областей солнечной короны уносится наружу в гелиосферу. Такие выбросы имеют энергию порядка 10^{24} Дж и массу 10^{12} — 10^{13} кг и вызывают мощные возмущения солнечного ветра, которые в ряде случаев приводят к сильным магнитным бурям на Земле. Физические механизмы выбросов корональной массы (ВКМ) к настоящему времени еще мало изучены. Здесь предложена модель, согласно которой ВКМ представляют собой магнитно-вихревые кольца с облаком присоединенной массы. Движение вихревых колец с вмороженным магнитным полем ранее изучалось в работах [2, 3] с целью объяснения феномена шаровых молний. Мы делаем попытку использовать математическую модель магнитно-вихревого кольца для объяснения свойств корональных выбросов массы. При этом в качестве параметров, определяющих свойства магнитно-вихревого кольца, были взяты наблюдаемые величины начальной скорости и начальных размеров ВКМ. В модели учтено изменение плотности вещества солнечного ветра с увеличением расстояния от Солнца. Численное моделирование показало, что найденная скорость мало отличается от наблюдаемой. Динамика размеров кольца, размеры которого быстро увеличиваются при его движении от Солнца, а потом приобретают стационарное значение, достаточно хорошо согласуется с наблюдениями. Рассчитанное время движения выброса от Солнца до орбиты Земли в рассмотренной математической модели соответствует реально наблюдаемому 6 сут.

Полученные результаты подтверждают возможность интерпретации ВКМ в виде магнитно-вихре-

вого кольца. Необходимо отметить, что предложенная модель является первым приближением в построении модели ВКМ. Она может быть улучшена за счет учета диссипации в вихревом движении и учета потерь внутренней энергии кольца на излучение.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВКМ

Выброс вещества из солнечной короны — одно из проявлений солнечной активности, которое еще не изучено до конца. Хотя теории предсказывали существование ВКМ достаточно давно, непосредственное наблюдение ВКМ впервые было произведено в начале 1970-х гг.

ВКМ обычно наблюдаются вместе с другими формами солнечной активности и, подобно им, частота их появления зависит от времени в пределах 11-летнего цикла. По наблюдательным данным ВКМ появляется 3.5 раза в день во время максимума и 0.1 раза в день во время минимума солнечной активности. Иногда ВКМ появляются одновременно с солнечными вспышками, но вспышка не является фактической причиной ВКМ. Возле Солнца скорость ВКМ может принимать значения от 50 до 2000 км/с. Из данных наблюдений известно, что есть два класса ВКМ. Большинство ВКМ составляет первый класс с начальными скоростями ниже 300 км/с, которые продолжают ускоряться до скорости нормального солнечного ветра. Второй класс ВКМ имеет широкий диапазон начальных скоростей, больших чем 300 км/с (больших, чем скорость солнечного ветра). Такие ВКМ должны иметь другую природу ускорения. Иногда направление ВКМ не совпадает с нормалью к поверхности Солнца в месте выброса, когда движение ВКМ происходит под острым углом к поверхности Солнца.

Космические снимки SOHO показывают, что ВКМ быстро расширяется и на протяжении нескольких часов становится намного больше Солнца. Так как расширение происходит одновременно во всех направлениях, то плотность и температура плазмы ВКМ уменьшаются с увеличением расстояния от Солнца быстрее, чем в солнечном ветре. Таким образом, на расстоянии 1 а. е. ВКМ характеризуются аномально низкими температурами по сравнению с характерными температурами солнечного ветра, а на расстоянии приблизительно 3 а. е. — также и низкой плотностью.

Масса обычного ВКМ составляет 10^{12} — 10^{13} кг, что составляет приблизительно 5 % от суточной потери массы Солнцем из-за истечения солнечного ветра. Энергия, связанная с ВКМ, составляет 10^{23} — 10^{25} Дж (в среднем 10^{24} Дж), в то время как энергия, ежедневно уносимая солнечным ветром, близка к $2.3 \cdot 10^{25}$ Дж. Таким образом, потери массы и энергии Солнцем вследствие ВКМ глобально не существенны.

МОДЕЛИ ВКМ

В настоящее время есть несколько моделей ВКМ. В них обычно полагается, что ВКМ образуются в результате пересоединения магнитных силовых линий. Остановимся на двух наиболее известных моделях.

В первой из них предполагается, что ВКМ появляется из-за пересоединения силовых линий в магнитной аркаде [6—12]. Из-за продольной составляющей магнитного поля вдоль аркады магнитные силовые линии имеют спиральную структуру. Причины, по которым эта спираль движется от Солнца, могут быть различными, например, из-за развития неустойчивости или из-за ускорения солнечным ветром. Эта модель схематически изображена на рис. 1, а.

Во второй модели [6] предполагается, что пересоединение силовых линий происходит вблизи поверхности Солнца, как это изображено на рис. 1, б. В этом случае открытая магнитная петля, сокращаясь, уносит с собой облако плазмы, являющееся частью солнечной короны.

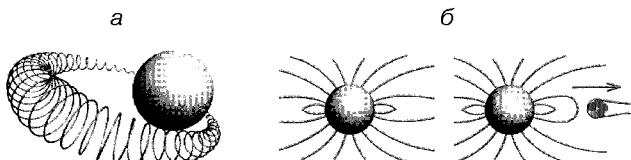


Рис. 1. Модель ВКМ в виде магнитной петли (а) и модель ВКМ из-за перезамыкания силовых линий вблизи Солнца (б)

Однако на ряд вопросов эти модели не отвечают. Так, не совсем ясным в рамках этих моделей является эффект расширения ВКМ. Выше отмечалось, что на расстояниях порядка десятков радиусов Солнца ВКМ характеризуются низкими температурой и плотностью, что исключает возможность объяснить расширение за счет внутреннего газокинетического давления, а механизм расширения магнитным полем маловероятен. Кроме того, в этих моделях не решена проблема равновесия и устойчивости данных конфигураций, а в первой из моделей неизвестна также топология на концах магнитной спирали.

Ранее отмечалось, что выброс может распространяться под острым углом к поверхности Солнца, что указывает на наличие нерадиального компонента собственной скорости выброса [8]. Этот факт трудно объяснить на основании вышеуказанных моделей.

Предлагаемая ниже модель позволяет ответить на указанные вопросы. Наша модель базируется на основном предположении, что ВКМ являются магнитно-вихревыми кольцами [2—4] (рис. 2, а). Устойчивость магнитно-вихревых колец ранее была подтверждена теоретически и экспериментально. Известно, что эти кольца в зависимости от внешних условий могут расширяться или сжиматься, при этом изменяя свою скорость. Последнее свойство этих колец позволяет объяснить расширение ВКМ до экспериментально наблюдаемых плотности и температуры, а также объяснить движение ВКМ не по нормали к Солнцу.

МОДЕЛЬ ВКМ В ВИДЕ МАГНИТНО-ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

Ниже приведена простейшая аналитическая модель, рассчитанная из соображений, что ВКМ представляют собой магнитно-вихревые кольца, окруженные облаком присоединенной плазмы. Типичное магнитно-вихревое кольцо схематически изображено на рис. 2, б.

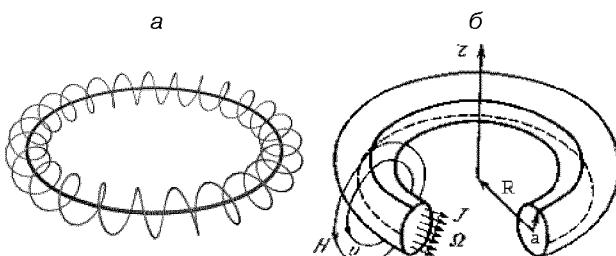


Рис. 2. Топология ВКМ (а) и электродинамическая ВКМ в модели магнитно-вихревого кольца (б)

Следуя подходам, изложенным в работах [2—5], мы получаем следующие уравнения движения ВКМ:

$$\begin{cases} \dot{Z} = \frac{1}{2\pi\rho_1 R\Gamma} \left(\frac{\partial K}{\partial R} - \frac{\partial M}{\partial Z} \right) + v_{\text{wind}}, \\ \dot{R} = \frac{-1}{2\pi\rho_1 R\Gamma} \left(\frac{\partial K}{\partial Z} - \frac{\partial M}{\partial R} \right) + \frac{V(\rho_0 - \rho_1)}{2\pi\rho_1 R\Gamma} \frac{\partial \varphi}{\partial Z}, \end{cases} \quad (1)$$

где $K = \rho_1 \Gamma^2 R / 2 \cdot (\ln(8R/a) - 7/4)$ — кинетическая энергия вихревого движения, $M = I^2 L / 2c^2 = \Phi^2 / 2L$ — энергия магнитного поля внутри кольца, $L = R\varepsilon$ — индуктивность кольца, $\varepsilon = \ln(8R/a) - 7/4$, R , a — большой и малый радиус кольца, ρ_1 , ρ_0 — плотности вне и внутри кольца, φ — гравитационный потенциал, Γ — завихренность, Φ , I , c — магнитный поток, ток и величина скорости света в вакууме соответственно.

Для дальнейшего анализа уравнения (1) удобно свести к безразмерному виду. Обозначим через r , z безразмерные радиус кольца и расстояние до Солнца. В качестве характерного пространственного масштаба возьмем радиус Солнца — $R_\odot = 8.96 \cdot 10^8$ м, а в качестве характерной скорости — $v_+ = 1000$ км/с. Введя в качестве характерной плотности плотность нижней области солнечной короны $\rho = 1.67 \cdot 10^{-13}$ кг/м³, мы можем представить плотность в следующем виде: $\rho_1 = \rho\beta$ и $\rho_0 = \rho\alpha$, где α и β — безразмерные плотности плазмы внутри и снаружи кольца. С целью упрощения модели будем считать, что плотность плазмы внутри кольца однородна. Если пренебречь диффузией плазмы из кольца, то $V\rho_0 = \text{const}$, поэтому для определения плотности необходимо знать лишь геометрические параметры кольца. Также будем считать, что форма кольца, т. е. отношение R/a , является величиной постоянной. Тогда

$$V(R) = V(R_0)(R/R_0)^3 = V(R_0)(r/r_0)^3.$$

В этом случае параметр ε также окажется неизменным.

С учетом изложенного уравнения (1) принимают вид

$$\begin{cases} \dot{z} = \frac{\Gamma}{4\pi v_+ R_\odot} \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\Phi^2}{\rho \Gamma^2 R_\odot^2} \frac{1}{\beta(r\varepsilon)^2} \right) \frac{\partial(r\varepsilon)}{\partial r} + \frac{v_{\text{wind}}}{v_+}, \\ \dot{r} = \frac{-\Gamma}{4\pi v_+ R_\odot} \varepsilon \frac{\partial(\ln\beta)}{\partial z} - \frac{V_0 GM_\odot}{2\pi \Gamma v_+ R_\odot^3} \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^3 \frac{1}{rz^2}. \end{cases} \quad (2)$$

Введем безразмерные коэффициенты:

$$A = \Gamma / 4\pi v_+ R_\odot, \quad B = \Phi^2 / \rho \Gamma^2 R_\odot^2,$$

$$C = V_0 GM_\odot / 2\pi \Gamma v_+ R_\odot^3.$$

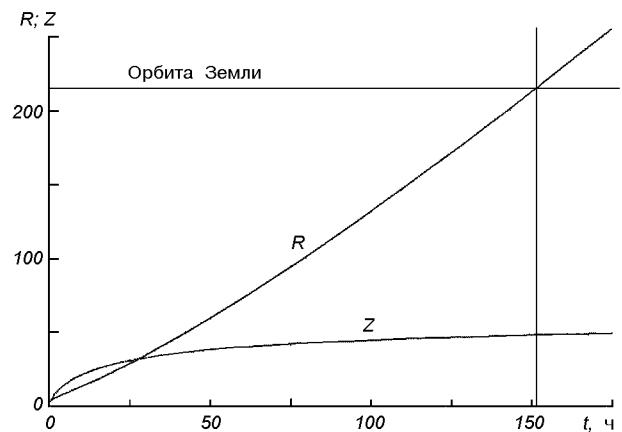


Рис. 3. Зависимость радиуса кольца и его расстояния до Солнца во времени

Тогда уравнения (2) можно записать в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \dot{z} = A \frac{\varepsilon}{r} \left(1 - B \frac{1}{\beta(r\varepsilon)^2} \right) + \frac{v_{\text{wind}}}{v_+}, \\ \dot{r} = -A\varepsilon \frac{\partial(\ln\beta)}{\partial z} - C \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^3 \frac{1}{rz^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Исходя из выбранных начальных значений плотности, размеров и энергии выброса, возьмем безразмерные параметры модели в виде $A = 0.49$, $B = 1.95 \cdot 10^{-4}$, $C = 1.13 \cdot 10^{-8}$, $\alpha_0 = 4$.

Численное решение системы (3) дает зависимости радиуса кольца и его расстояния от Солнца во времени, которые будут использованы для сравнения с экспериментальными данными (рис. 3).

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦА С ДАННЫМИ ВКМ

На рис. 4 представлено сравнение наблюдаемых скоростей ВКМ с расчетными из уравнений (3). Сплошные черные линии — экспериментальные данные SOHO [10]; кружки — теоретический расчет для начального радиуса ВКМ, равного 1/6 радиуса Солнца; квадратики — для начального радиуса, равного 1/60 радиуса Солнца. Влиянием собственного магнитного поля кольца пренебрегалось вследствие его слабого влияния на расчетные величины. Видно, что скорости, рассчитанные из уравнений (3), имеют большие величины на малых расстояниях от Солнца и быстро уменьшаются до значений, соответствующих скорости солнечного ветра.

Известно, что если вихрь движется в среде, то он

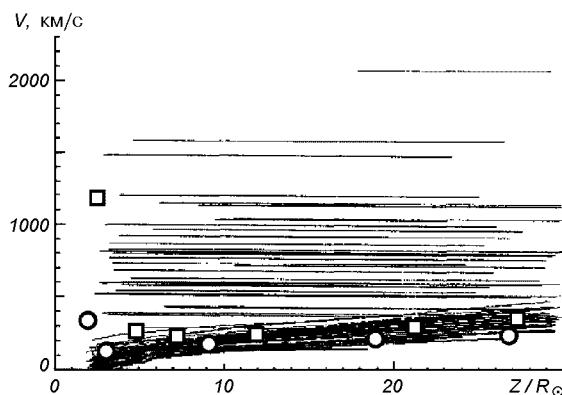


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых и расчетных скоростей ВКМ

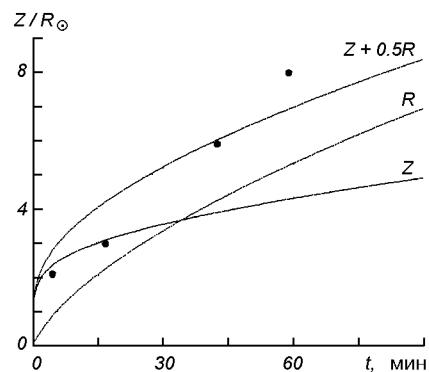


Рис. 6. Сравнение удаления от Солнца переднего края наблюдаемых и рассчитанных ВКМ вблизи Солнца

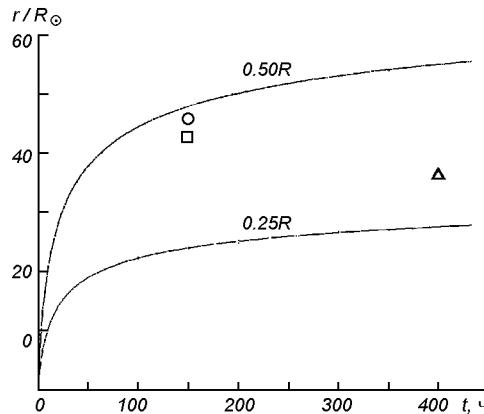


Рис. 5. Сравнение размеров наблюдаемых и рассчитанных ВКМ на больших расстояниях от Солнца

увлекает за собой облако присоединенной массы, которое имеет форму, близкую к эллипсоидальной. Нами были оценены размеры облака, возникающего вокруг магнитно-вихревого кольца. Оказалось, что они сравнимы с размерами реальных выбросов. При оценках предполагалось, что ось эллипса, направленная по оси движения, в 1—4 раза меньше радиуса кольца.

На рис. 5 показано сравнение рассчитанных и наблюдаемых размеров ВКМ. Экспериментальные данные получены с помощью спутников WIND, «Интербол-1» [1] (кружок) и «Ulysses» [10] (треугольник). Линии на рис. 5 — предполагаемый продольный размер ВКМ при различных отношениях продольной оси эллипса и радиуса кольца. Модель ВКМ в виде петли [14] представлена на рисунке квадратиком. Таким образом, видно, что облако присоединенной массы является эллипсом с соотношением осей от 1:1:4 до 1:1:2.

На рис. 6 показано сравнение рассчитанного

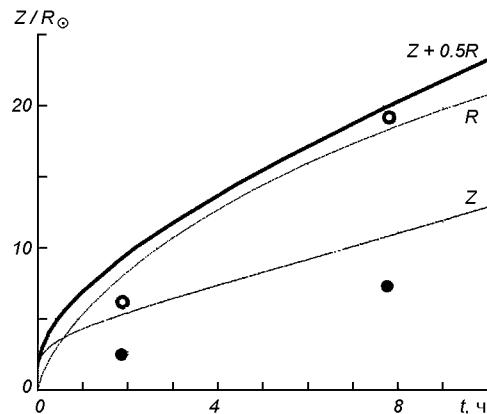


Рис. 7. Сравнение размеров наблюдаемых и рассчитанных ВКМ на расстоянии нескольких радиусов Солнца

удаления кольца и наблюдаемого удаления ВКМ от Солнца во времени. Верхняя линия $Z(t) + R(t)/2$ — рассчитанное удаление переднего края облака присоединенной массы; точки — данные радиогелиографа Nançay [13], который фиксировал передний край ВКМ. Предполагалось, что малая (продольная) полуось эллипса присоединенной плазмы равна радиусу кольца.

На рис. 7 приведено подобное сравнение для больших временных интервалов (верхняя линия $Z(t) + R(t)/2$ — рассчитанное удаление, верхние светлые точки — удаление ВКМ от Солнца), а также сравнение рассчитанного радиуса кольца (нижняя линия $Z(t)$) и радиуса ВКМ (нижние темные точки). ВКМ наблюдался коронографом SOHO (http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2000_02_26/c3.gif).

Таким образом, представление ВКМ в виде магнитно-вихревого кольца не противоречит наблюдениям.

ВЫВОДЫ

Показано, что динамика наблюдаемого ВКМ разумно согласуется с динамикой движения магнитно-вихревого кольца. Продемонстрировано, что модель магнитно-вихревого кольца позволяет объяснить эффекты расширения ВКМ, его устойчивость и возможность движения не по нормали к поверхности Солнца.

В дальнейшем авторы надеются учесть более тонкие эффекты динамики ВКМ (диссипация, количество присоединенной массы) и исследовать механизмы образования магнитно-вихревого кольца.

1. Застенкер Г. Н., Зеленый Л. М. Солнечные магнитные облака атакуют Землю // Земля и Вселенная.—1999.—№ 5.—С. 46.
2. Ладиков-Роев Ю. П. Магнитно-вихревые кольца // Изв. АН СССР. Сер. техн. наук, механики и машиностроения.—1960.—№ 4.—С. 7—13.
3. Ладиков-Роев Ю. П. Некоторые задачи динамики магнитно-вихревых конфигураций // Прикладная математика и механика.—1960.—24, вып. 5.—С. 897—905.
4. Ладиков-Роев Ю. П., Сальников Н. Н. К вопросу о сложном поведении динамических систем. Динамика движения системы вихрей в идеальной жидкости // Проблемы управления и информатики.—2002.—№ 3.—С. 47—60.
5. Ламб. Гидродинамика. — М.-Л., 1947.
6. Прист Э. и др. Космическая магнитная гидродинамика: Пер. с англ. / Под ред. Э. Пристя и А. Худа. — М.: Мир, 1995.
7. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

8. Gopalswamy N., Thompson B. J. Early life of coronal mass ejections // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.—2000.—62, N 16.—P. 1457—1469.
9. Gopalswamy N. Coronal mass ejections: Initiation and detection // Advances in Space Research.—2003.—31, N 4.—P. 869—881.
10. Gostling J. T. Coronal Mass Ejections // Geophys. Monograph.—1997.—99.—P. 4201—4219.
11. Lin J., Soon W. Evolution of morphological features of CMEs deduced from catastrophe model of solar eruptions // New Astronomy.—2004.—9, N 8.—P. 611—628.
12. Linker J. A. et al. Flux cancellation and coronal mass ejections // Physics of Plasmas.—2003.—10, N 5.—P. 1971—1978.
13. Pick M., Maia D., Marque Ch. Solar radio observations and development of coronal mass ejections // Advances in Space Research.—2003.—32, N 4.—P. 467—472.
14. Russell C. T., Mulligan T. On the magnetosheath thicknesses of interplanetary coronal mass ejections // Planetary and Space Sci.—2002.—50, N 5/6.—P. 527—534.

MAGNETO-VORTICAL MODEL OF CORONAL MASS EJECTION

Yu. P. Ladikov-Roev, A. A. Linnik, N. N. Salnikov,
O.K.Cheremnykh

The model of coronal mass ejections (CME) from the Sun as magneto-vortical structure is proposed. The model allowed one to explain effects of expansion of CME, their stability and movement not along the normal to the Sun's surface; these phenomena were not explained in the framework of the models proposed before. Calculations carried out with the use of the model are in good agreement with observed CME movement data.

УДК 523.9

© O. С. Гопасюк, С. И. Гопасюк

Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

О КОЛЕБАНИЯХ ПОЛУТЕНИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Досліджено коливання півтіні чотирьох одиночних плям за спостереженнями променевих складових магнітного поля і швидкості у фотосферній лінії Fe I λ 525.3 нм. За променевою складовою були відтворені всі три складові векторів.Період коливань склав 3.4—7.7 сут. Для кожної плями коливання азимутальної складової швидкості випереджували по фазі коливання всіх інших складових векторів магнітного поля і швидкості. При густині плазми у півтіні $0.1 \text{ г}/\text{м}^3$, що відповідає густині незбуреної фотосфери, густина кінетичної енергії коливань менша, ніж густина магнітної енергії на 1-2 порядки.

Крутильные колебания пятен с периодом около 6 сут были обнаружены в 1981 г. [3] на основании наблюдений лучевых скоростей в фотосфере, фотогелиограмм и изображений активных областей в H_{α} . В дальнейшем [8] было показано, что крутильные колебания пятен не уникальное, а скорее, характерное явление их состояния. Спектр колебаний одиночных пятен отличается от спектра колебаний пятен в группах. Амплитуда колебаний уве-

личивается с ростом периода. Период и амплитуда становятся больше к максимуму солнечной активности [8]. Данные о крутильных колебаниях были использованы для определения структуры магнитного поля и движений плазмы в подфотосферных слоях [4].

Угол закрученности структуры поперечного поля на границе полутеней — фотосфера соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиог-

раммам. Скорость вращения пятен, вычисленная по фотогелиограммам, в 5—6 раз меньше азимутальной скорости, вычисленной по полю лучевых скоростей [3]. Появление вспышек тесно коррелирует с вращением пятен [2, 7].

Подобные результаты по вращению пятен были получены в [10] по снимкам в белом свете с привлечением H_{α} -снимков, УФ-изображений ($\lambda \lambda 160.0$ нм, 17.0 нм) и SOHO/MDI магнитограмм.

Ниже изложены результаты исследований крутильных колебаний полутени четырех одиночных пятен по наблюдениям лучевых составляющих магнитного поля и скорости в фотосферной линии.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдения трех одиночных пятен были получены в 1978 г. на двойном магнитографе [9] и одного пятна в 2000 г. на быстродействующем цифровом магнитографе [6] БСТ НИИ КраО. Во все дни наблюдений входная щель спектрографа составляла $1'' \times 2''$. Продольные магнитные поля, лучевые скорости и яркости были измерены в линии Fe I $\lambda 525.3$ нм, фактор Ланде которой равен 1.5. Входные щели фотометра пропускали свет в интервале от 3.5 до 9.0 пм от центра линии и в пределах ± 3.5 пм от центра линии при регистрации яркости в ядре линии. Величина магнитного поля, при котором происходил сдвиг центра σ -компонентов на середину щелей фотометра, соответствовала напряженности 323.8 мТл. Дата наблюдений, широта φ каждого пятна, радиусы области полутени, в которой исследовались колебания, приведены в таблице.

По каждой карте яркости в пятне была выделена полутень пятна с яркостью $0.7 \leq I \leq 0.9$. Наличие осевой симметрии у магнитного поля и поля скоростей одиночных пятен позволило восстановить все три составляющие (вертикальную, радиальную — вдоль радиуса пятна и азимутальную) обоих векторов по полю их лучевой составляющей [5]. При вычислениях был учтен наклон магнитной оси этих пятен к западу на 10° [1]. Если в течение дня проводилось несколько серий наблюдений, то брались средние значения составляющих за день. Данные вычислений для каждого пятна каждой из составляющих были представлены в зависимости от времени t , для них методом наименьших квадратов была подбрана синусоида

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi t}{T} + \alpha \right),$$

где A — амплитуда, T — период и α — начальная фаза колебания.

Основные характеристики пятен и их колебаний

Параметр	13—18 сентября 1978	15—22 сентября 1978	13—20 сентября 1978	18—22 августа 2000
φ , град	16	28	37	-6
Радиус ($I = 0.7$), см	15.2	16.8	10.1	12.2
Радиус ($I = 0.9$), см	19.7	22.9	14.1	18.7
T , сут	6.9	6.5	7.7	3.4
H_f	A , мТл	21.8	37.2	23.3
	α , ч	7.9	130.0	153.4
H_r	A , мТл	22.0	18.8	19.3
	α , ч	105.6	60.0	112.1
H_z	A , мТл	6.8	28.0	9.9
	α , ч	110.9	132.5	100.3
V_f	A/T , град/сут	58	123	71
	A , м/с	176.2	429.3	150.8
	α , ч	116.2	140.0	156.4
V_r	A , м/с	1300.0	430.6	700.4
	α , ч	42.2	137.5	153.4
V_z	A , м/с	82.3	403.7	215.5
	α , ч	110.9	135.0	20.7
	$E_k(f)/E_m(f)$	0.00821	0.01674	0.00526
	$E_k(r)/E_m(r)$	0.43878	0.06592	0.16550
	$E_k(z)/E_m(z)$	0.01841	0.02612	0.05954
				0.80962

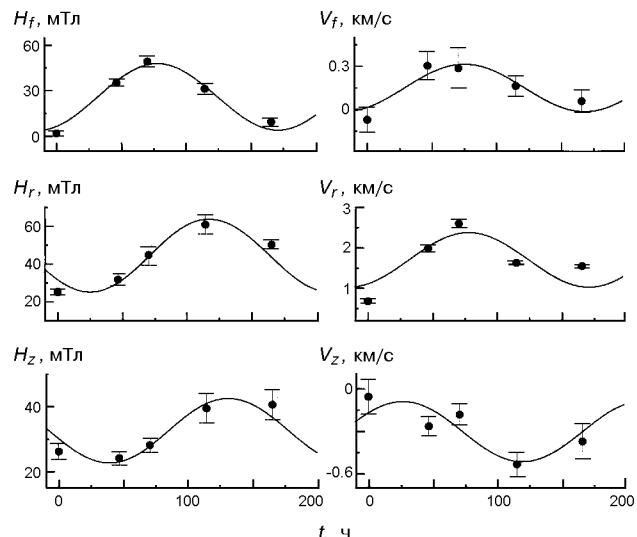


Рис. 1. Изменение со временем составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости для пятна с $\varphi \approx 37^\circ$. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проведены синусоиды

На рис. 1 показаны примеры аппроксимации временных зависимостей синусоидой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой составляющей каждого пятна были вычислены амплитуда, период и начальная фаза

колебаний. Результаты вычислений A , T и α приведены в таблице. Они показывают, что период колебаний в полутени исследуемых четырех пятен приходится на 3.4—7.7 сут. Для всех составляющих векторов скорости и магнитного поля каждого пятна период одинаков, амплитуды и начальные фазы их разные.

Азимутальная скорость вращения пятна, вычисленная по фотогелиограммам (твердотельное вращение):

$$V_p = 2\pi \frac{A}{360} \frac{R}{T},$$

где R — радиус внешней границы полутени (таблица) и A — средняя амплитуда поворота пятна. Приравняв эту скорость V_p азимутальной скорости V_f , вычисленной по данным лучевой скорости, находим среднюю угловую скорость вращения пятна:

$$\frac{A}{T} = \frac{360}{2\pi} \frac{V_f}{R}.$$

Результаты вычислений A/T (град/сут) приведены в таблице. Согласно измерениям [8] максимальная скорость вращения пятна меньше 60 град/сут. Из данных вычислений видно, что азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм, что согласуется с данными [3]. В то же время закручивание силовых линий поперечного магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам [2]. Возможно, это наблюдаемое несоответствие связано с тонкой структурой и неоднородностью магнитного поля и плазмы в полутени пятен.

Разность фаз не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания остальных составляющих как вектора скорости, так и вектора магнитного поля. Это может означать, что крутильные колебания пятна являются вынужденными колебаниями. Начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с ростом широты пятна (рис. 2).

По данным таблицы были вычислены отношения плотности кинетической энергии E_k к плотности магнитной энергии E_m колебаний для соответствующих составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Вычисления были проведены при плотности плазмы в полутени $\rho = 0.1 \text{ г}/\text{м}^3$, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы. Во всех случаях плотность кинетической энергии колебаний составляющих скорости оказалась мень-

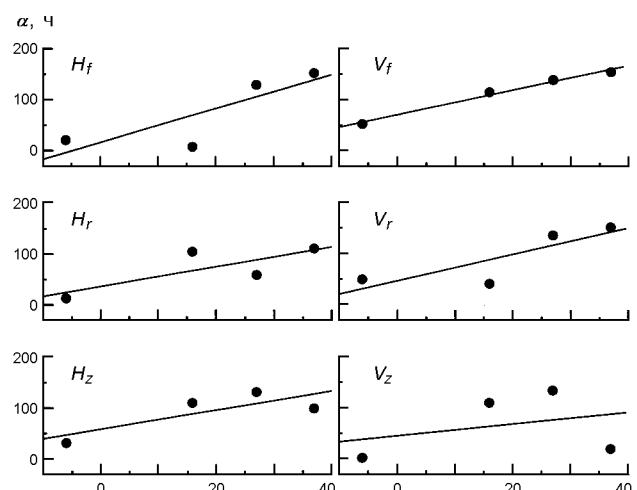


Рис. 2. Изменение начальной фазы α колебаний составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости в зависимости от широты φ пятна

шее плотности магнитной энергии колебаний. В подавляющем большинстве случаев это различие достигает 1-2 порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, выделим наиболее важные положения.

Период колебаний полутени по наблюдениям четырех пятен составил 3.4—7.7 сут.

Разность фаз не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания составляющих как вектора скорости, так и вектора магнитного поля. Азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, больше азимутальной скорости, измеренной на основании фотогелиограмм. В то же время закручивание силовых линий поперечного магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам. Начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с ростом широты пятна (рис. 2).

При плотности плазмы $\rho = 0.1 \text{ г}/\text{м}^3$, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы, для одноименных составляющих плотность кинетической энергии меньше плотности магнитной энергии. В большинстве случаев это различие достигает 1-2 порядков. Имеется некоторая тенденция умень-

шения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

1. Гопасюк О. С. Структура магнитного поля одиночного пятна // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 2.—С. 126—137.
2. Гопасюк С. И. Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1965.—33.—С. 100—110.
3. Гопасюк С. И. Некоторые особенности вращения пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1981.—64.—С. 108—118.
4. Гопасюк С. И. Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля // Астрон. журн.—1984.—61, вып. 1.—С. 157—162.
5. Гопасюк С. И., Гопасюк О. С. Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. I. Наблюдения по фотосферным линиям // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 5.—С. 389—400.
6. Гопасюк С. И., Залесов И. П. Цифровой вектор-магнитограф. I. Канал продольного поля. // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 5.—С. 48—54.
7. Гопасюк С. И., Лазарева Л. Ф. Поле скоростей и вспышечная активность в группе пятен // Изв. Крым. астрофиз.

- обсерватории.—1986.—74.—С. 84—92.
8. Гопасюк С. И., Лямова Г. В. Крутильные колебания солнечных пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1987.—77.—С. 17—24.
 9. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца: I. Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—65.—С. 3—34.
 10. Brown B. N., Nightingale R. W., Alexander D., et al. Observations of rotating sunspots from TRACE // Solar Phys.—2003.—216, N 1-2.—P. 79—108.

ON SUNSPOT PENUMBRA OSCILLATIONS

O. S. Gopasyuk, S. I. Gopasyuk

Oscillations of the penumbras of four sunspots are investigated from the observations of longitudinal components of the magnetic field and velocity in the photospheric line FeI 525.3 nm. The period of oscillations of sunspot penumbrae lies in the range from 3.4 to 7.7 days. The phase of the azimuthal component of the velocity was ahead of the phases of all other components. If the density of plasma in a penumbra is 10^{14} kg/m³ (the same as in the photosphere), the magnetic energy of oscillations exceeds the kinetic energy of the same components by a factor of 10 to 100.

УДК 523.9-327:519.246.8:517.443

© Я. И. Зелык¹, Н. Н. Степанян², О. А. Андреева²

¹Інститут космічних досліджень НАН України і НКА України, Київ

²Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

ВРАЩЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА В ЛИНИИ Не I λ 1083 нм

Методи спектрального анализа часовых рядов застосовано до досліджень обертання корональних дір, флокул і активних областей з групами сонячних плям за спостереженнями в лінії Не I λ 1083 нм. Отримано середні характеристики обертання цих утворень за три сонячних цикли. Для 21-го циклу визначено зміни обертання з широтою і часом.

Наблюдаемые на Солнце активные и спокойные образования несомненно связаны между собой. Но в то же время каждый тип образований имеет свои характерные особенности, позволяющие судить об их природе, глубине их источников.

Регулярное получение изображений Солнца в линии Не I λ 1083 нм представляет исключительную возможность иметь одновременно информацию о яркости и положении на диске сразу нескольких видов солнечных образований.

Одной из важных характеристик солнечных образований является их дифференциальное вращение и его изменение со временем. К настоящему времени выполнено множество работ по определению

вращения Солнца различными методами. Ранние измерения проводились по трассерам, затем по измерению лучевых скоростей. В последние годы основным стал метод спектрального анализа периодов вращения на основе преобразования Фурье временных рядов наблюдений различного вида. Большинство таких работ касается наблюдений солнечных магнитных полей [2, 4, 5].

Цель данной работы — изучение дифференциального вращения корональных дыр (КД), флокуллов (ФЛ) и мощных активных областей (АО) с группами солнечных пятен по наблюдениям в линии Не I λ 1083 нм.

Исходным материалом послужили наблюдения

Солнца в линии $\text{He I } \lambda 1083$ нм, полученные на обсератории Китт Пик (США) и любезно предоставленные в распоряжение НИИ КрАО. Наблюдения охватывают три солнечных цикла с января 1977 до сентября 2003 г. Это соответствует 358 каррингтоновским оборотам Солнца №№ 1630–2007. Материал наблюдений представляет собой синоптические карты, составленные из ежедневных изображений Солнца, полученных в линии $\text{He I } \lambda 1083$ нм. В числовом виде каждая карта представляет собой двумерный массив, в котором 180 строк и 360 столбцов.

Для приведения всех наблюдений к единой фотометрической системе все карты были нормированы таким образом, что интенсивность невозмущенных областей, занимающих на Солнце максимальную площадь, принимала значения 1. По нормированным картам были определены интервалы интенсивностей, относящиеся к трем типам объектов: $I > 1.05$ для КД, $0.6 < I < 0.8$ для ФЛ и $I < 0.5$ для АО. Для исследования широтных зависимостей карты разбивалась на 17 широтных интервалов в области $-0.95 < \sin\phi < 0.95$. Соединение распределений для одноименных широтных интервалов всех карт дает 17 временных рядов изменения яркости Солнца на центральном меридиане в 17 широтных интервалах за время с января 1977 до сентября 2003 г. Эти ряды являются материалом для дальнейшего исследования. Для каждого типа солнечных образований в этих рядах всем элементам, не удовлетворяющим по интенсивности выше названным условиям, придавалось значение 1.

Применительно к решаемой задаче были исследованы следующие методы спектрального анализа [1, 3, 7]: непараметрические — метод периодограмм, Welch's method, multitaper method; параметрические — Yule-Walker autoregressive method, Burg method; частотно-временной — спектрограмм; метод построения подпространств — multiple signal classification (MUSIC) method. Методы выявления периодичностей и оценки спектральной плотности мощности в частотных интервалах, охватывающих характерные периодичности, реализованы в системе MATLAB с использованием проблемно ориентированного набора функций Signal Processing Toolbox. В конечном итоге по критерию простоты реализации и обеспечиваемой при этом достоверности и эффективности были выбраны следующие методы. Для выявления периодичностей — процедура вычисления несглаженных периодограмм, пропорциональных квадратам модулей коэффициентов Фурье, построения их зависимостей от частоты и от обратной частоты (периода) и поиск точек локальных максимумов в этих зависимостях. Для

оценивания спектральной плотности мощности — метод периодограмм, Welch's method. Обработка построенных 17 временных рядов реализуется с применением новых разработанных функций в MATLAB следующим образом.

— Фильтрация всех рядов данных с помощью спроектированного в среде SPTool цифрового фильтра нижних частот, отсекающего во всех процессах составляющие с частотами, выше частоты Найквиства в спектре.

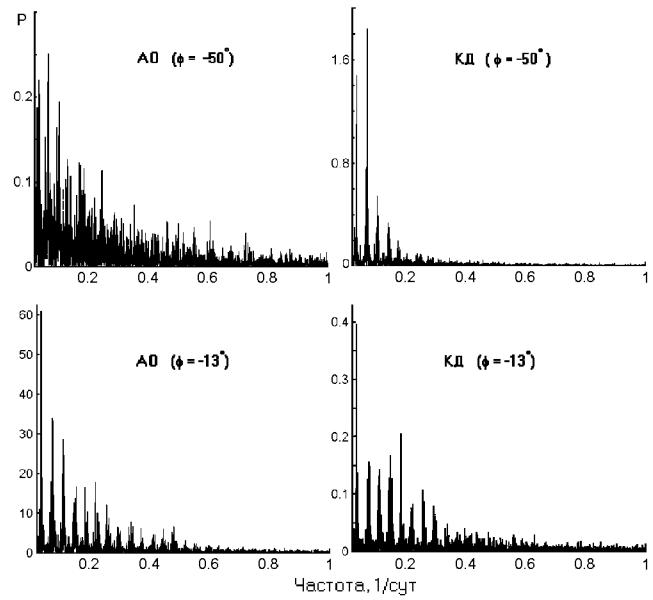
— Вычисление спектральных плотностей мощности процессов для различных широтных диапазонов. Оценка по ним периодов трех видов солнечных структурных образований, выбор диапазонов периодов, охватывающих характерные периодичности.

— Вычисление суммарных мощностей процессов в выбранных интервалах периодов для полных временных реализаций и для различных фаз циклов солнечной активности.

— Построение зависимостей суммарных мощностей всех процессов от широты и времени.

— Вычисление спектральных плотностей мощности всех процессов в некотором скользящем окне и определение по ним текущих значений периодов вращения различных солнечных образований в каждом широтном интервале.

На рисунке приведены полученные спектральные плотности мощности для активных областей и корональных дыр в широтных диапазонах L2 ($\phi = -50^\circ$) и L7 ($\phi = -13^\circ$). Вероятность случайного появления наблюдаемых пиков в спектре мощности превыша-



Спектральные плотности мощности P в широтных зонах для 21-го цикла активности

ет 4σ . Как видно, максимальные значения спектральных плотностей сосредоточены в определенных диапазонах периодов. Ниже будут рассмотрены три диапазона периодов: 7.7–11, 11–20 и 20–35 сут. Для каждого из этих диапазонов были определены суммарные мощности процессов, соответствующих трем типам солнечных структурных образований.

Было показано, что максимальное значение суммарной мощности чаще всего приходится на интервал периодов 15.5 сут, и в одних тех же частотных диапазонах максимальное значение суммарной мощности спектра изменяется от цикла к циклу. Это свидетельствует о долгосрочном существовании на Солнце двухсекторных структур. Время жизни таких структур соизмеримо с циклом активности.

Анализ спектров мощности показал, что изменение с широтой суммарной мощности спектра в интервале периодов 20–35 сут для КД существенно отличается от изменения с широтой для АО и ФЛ. Суммарные мощности спектров для АО и ФЛ на низких и средних широтах практически совпадают. Отличия заметны лишь на высоких широтах. Этот результат подтверждает более ранние выводы [6] о различной природе активных образований и КД. Различие суммарной мощности спектров АО и ФЛ на высоких широтах и близкое совпадение на низких широтах говорит о том, что слабые флоккулы, окружающие сильные активные области, отличаются по своим кинематическим характеристикам от изолированных слабых флоккулов. Последние резче выделяются на широтах с низким количеством сильных активных областей.

Для изучения изменения вращения со временем в течение 21-го цикла солнечной активности для всех временных рядов были вычислены спектральные плотности мощности в скользящем окне длиной 10 каррингтоновских оборотов (272.5 сут) с текущим сдвигом на пять оборотов (132.25 сут). В диапазоне периодов 20–35 сут для всех широтных зон определялись значения периодов, соответствующих точкам максимума спектральной плотности. Эти периоды характеризуют вращение отдельных типов солнечных образований на каждой широте в текущее время. Результаты этих расчетов показали, что периоды вращения изменяются со временем и широтой по-разному для рассматриваемых солнечных структур. Для времени максимума и начала спада активности 21-го цикла (750–1750 сут от начала рядов) заметно увеличение со временем периода обращения на низких широтах и уменьшение его на средних широтах для всех структурных образований. Граница перемены знака для каждой из структур находится на своей широте.

Дифференциальность вращения солнечных структурных образований определялась как разность периодов обращения структур в широтных диапазонах $\varphi = -50^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$. Анализ всего материала показал, что дифференциальность для АО, ФЛ и КД изменяется со временем в широких пределах, становясь иногда отрицательной, в то время общепринято представление о том, что на экваторе Солнце вращается быстрее, чем на высоких широтах.

Полученный широкий диапазон изменения дифференциального вращения со временем для всех рассмотренных солнечных образований может быть частично объяснен большими размерами отдельных структур (корональных дыр или целых комплексов активных областей) и их сильными собственными движениями, дающими заметный вклад в определение периодов вращения по материалу за 10 солнечных оборотов.

Работа выполнена в рамках контракта «Анализ», финансируемого НКАУ. В ней были использованы данные NSO/Kitt Peak, полученные совместно NSF/NOAA, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989.—540 с.
2. Васильева В. В., Макаров В. И., Тлатов А. Г. Циклы вращения секторной структуры магнитного поля Солнца и его активности // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 3.—С. 228–234.
3. Зелик Я. І. Активна компенсація полігармонічного вібраакустичного шуму і алгоритм виявлення частоти його основної гармоніки // Автоматика.—1994.—№ 3-4.—С. 22–29.
4. Котов В. А., Ханейчук В. И., Цап Т. Т. Новые измерения общего магнитного поля Солнца и его вращение // Астрон. журн.—1999.—87, Вып. 3.—С. 218–222.
5. Степанян Н. Н. Изменение дифференциального вращения фоновых магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—67.—С. 59–65.
6. Степанян Н. Н. Корональные дыры и фоновые магнитные поля на Солнце // Солнечный цикл: Сб. науч. тр. — РАН, ФТИ, 1993.—С. 44–55.
7. Hayes M. H. Statistical Digital Signal Processing and Modeling. — New York: John Wiley & Sons, 1996.—789 p.

ROTATION OF ACTIVE REGIONS AND CORONAL HOLES FROM OBSERVATIONS OF THE SUN IN THE LINE HE I λ 1083 NM

Ya. Zyelyk, N. Stepanian, O. Andreeva

Some methods of the spectral analysis of time series are applied to the study of the rotation of coronal holes, plagues and active regions with sunspot groups on the basis of the observations in the line He I λ 1083 nm. The mean characteristics for the rotation of these formations during three solar cycles are derived. The rotation changes with latitude and time are determined for 21 cycles.

© А. В. Степанов¹, Ю. Т. Іап², Ю. Г. Копылова¹, Е. Г. Куприянова¹

¹Головна (Пулківська) астрономічна обсерваторія РАН, Санкт-Петербург, Росія

²Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

КОРОНАЛЬНЫЕ ПЕТЛИ И ПУЛЬСАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД

На основі аналогії між зірковими і сонячними спалахами проведено аналіз десятисекундних коливань, виявленіх в смугах U та B для зірки EV Lac. Пульсації випромінювання пов'язуюмо з швидкими магнітозвуковими (ШМЗ) коливаннями корональних арок. Одержано оцінки магнітного поля $B \approx 32$ мТл, температури $T \approx 3.7 \cdot 10^7$ К і концентрації плазми $n \approx 1.6 \cdot 10^{11}$ см⁻³ в області енерговиділення. Наведено аргументи на користь локалізації джерела оптичного випромінювання в основах арок.

ВВЕДЕНИЕ

Основным структурным элементом короны Солнца и вспыхивающих красных карликов являются магнитные петли [1]. Ароочным структурам отводится особая роль. Согласно общепринятым сценарию солнечных вспышек в ходе энерговыделения в корональных петлях накапливаются ускоренные частицы, которые вследствие рассеяния «высыпаются» в их основаниях. Нагретая частицами плотная плазма нижней атмосферы излучает в бальмеровских линиях, а также в оптическом континууме, тогда как наиболее горячая ее часть с температурой $T = 10^6$ — 10^8 К, «испаряясь», заполняет ароочные структуры и высвечивается в ультрафиолетовом и в мягком рентгеновском диапазоне.

Правомерность такого сценария для красных карликов следует прежде всего из особенностей поведения профилей спектральных потоков. В частности, согласно Холи и др. [6] проинтегрированный по времени профиль вспышечного излучения AD Leo в полосе U совпадает с профилем, полученным в ультрафиолетовом диапазоне. Это свидетельствует о том, что эффект Нойперта, который является одним из наиболее веских аргументов в пользу нетепловой природы вспышек, характерен не только для Солнца, но и для вспыхивающих звезд.

Для диагностики звездных петель обычно привлекаются косвенные методики, включающие большое количество неизвестных параметров. Поэтому результаты разных исследований существенно расходятся. Это предполагает необходимость дальнейшего развития методов диагностики параметров корональных петель вспыхивающих звезд. По нашему мнению, значительный прогресс в данном направлении может быть достигнут благодаря ис-

ледованию тонкой временной структуры излучения звездных вспышек. В связи с этим особо отметим, что сравнительно недавно благодаря проведению синхронных наблюдений трех вспышек на EV Lac с помощью четырех телескопов, установленных в разных обсерваториях, удалось обнаружить синфазные квазипериодические осцилляции в полосах U и B с периодом $P = 10\ldots30$ с [12], чем убедительно показано, что колебания вспышечного излучения звезд реально существуют.

Маллен [8] на основе солнечно-звездной аналогии предложил связать наблюдаемые на вспыхивающих звездах квазипериодические осцилляции с взаимодействием конвективных движений с корональными магнитными петлями активных областей. Однако в рамках данной гипотезы трудно понять, почему квазипериодические пульсации излучения вспышек наблюдаются далеко не во всех событиях. На наш взгляд, более привлекательным выглядит подход, предложенный В. В. Зайцевым и А. В. Степановым [2], согласно которому наблюдаемые пульсации вызваны вспышечным энерговыделением или «испарением» хромосферной плазмы, что приводит к резкому увеличению газового давления внутри петель и возбуждению собственных магнитогидродинамических (МГД) колебаний.

СОБСТВЕННЫЕ МОДЫ КОЛЕБАНИЙ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

В пренебрежении силой тяжести из линеаризованной системы уравнений идеальной МГД следует, что в корональной петле могут возбуждаться четыре основные моды: винтовая, изгибная, медленная (ММЗ) и радиальная БМЗ [3—5, 10]. Рассмотрим

наиболее важные свойства собственных мод, ограничившись анализом первых гармоник (число полуволн, укладывающихся вдоль петли $q = 1$), полагая, что они должны возбуждаться наиболее эффективно.

Для винтовых и изгибных мод периоды колебаний соответственно равны

$$P_{\text{tor}} = 2L/V_{\text{Ai}}, \quad P_{\text{kink}} \approx 2L/V_f, \\ V_f^2 = \frac{\rho_i V_{\text{Ai}}^2 + \rho_e V_{\text{Ae}}^2}{\rho_i + \rho_e},$$

где V_{Ai} и V_{Ae} — альвеновские скорости внутри (i) и снаружи (e) петли, ρ_i и ρ_e — соответствующие плотности.

Сразу отметим, что винтовые моды не сжимают плазму, тогда как изгибные — лишь во втором порядке приближения. Откуда следует вывод, что данные моды не могут быть ответственны за пульсации большой амплитуды, наблюдаемые на EV Lac.

ММЗ-моды слабо возмущают магнитное поле, а их период

$$P_{\text{sound}} \approx 2L/c_{\text{Ti}}, \quad c_{\text{Ti}}^2 = \frac{c_{\text{si}}^2 V_{\text{Ai}}^2}{c_{\text{si}}^2 + V_{\text{Ai}}^2}.$$

Следовательно, согласно (1) длина корональной петли

$$L \approx c_{\text{si}} P_{\text{sound}} / 2 = 5.86 P \sqrt{T}.$$

Полагая в последней формуле температуру $T = 10^7 \dots 10^8$ К, $P = 10$ с, получим $L = (2 \dots 6) \cdot 10^8$ см. Для радиуса EV Lac $R_* = 0.39R$ [1] получаем $L/R_* = (0.7 \dots 2) \cdot 10^{-2}$, что ввиду мощной энергетики звездных вспышек представляется маловероятным.

Радиальные колебания петель (sausage modes), в зависимости от того, генерируют ли они бегущие МГД-волны в окружающей короне, могут быть излучательными или безызлучательными. Выбор между этими модами определяется параметрами петли. В частности, при малых значениях плазменного $\beta \ll 1$ критическое значение продольного волнового числа [3, 9, 10]

$$k_c = \left(\frac{j_0}{a}\right) \sqrt{\frac{1}{(V_{\text{Ae}}/V_{\text{Ai}})^2 - 1}}, \quad (2)$$

где $j_0 \approx 2.4$ — первый ноль функции Бесселя J_0 , a — радиус поперечного сечения петли. Если $k > k_c$, возбуждаются безызлучательные моды, а при $k < k_c$ — излучательные. Например, когда $V_{\text{Ae}}/V_{\text{Ai}} = 3$, положив $k_c = \pi/L_c$, из выражения (2) получим $a/L_c \approx 0.3$. Это предполагает, что в случае возбуждения безызлучательных мод звездные петли должны быть достаточно толстыми. В то же время

наблюдения показывают, что солнечные корональные петли отличаются малым соотношением $a/L < < 0.1$. Поэтому, на наш взгляд, за наблюдаемые осцилляции скорее ответственны излучательные моды, период которых [3, 4]

$$P_{\text{saus}} = 2\pi a/(j_0 V_r), \quad V_r^2 = V_{\text{Ai}}^2 + c_{\text{si}}^2.$$

ДИАГНОСТИКА ВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Пусть в корональной арке, которую можно представить в виде магнитной ловушки (коронального пробкотрона), вспышечное энерговыделение приводит к возбуждению БМЗ-колебаний корональных петель (рис. 1). Поскольку в условиях корон Солнца и звезд плазменный параметр $\beta = 8\pi r/B^2 \ll 1$, то, следуя работе [2], для амплитуды возмущения магнитного поля δB , обусловленного увеличением газового давления p внутри петли, имеем

$$p + \frac{B\delta B}{4\pi} = 0.$$

Записывая уравнение (4) в виде

$$\beta = |2\delta B/B|,$$

приходим к важному выводу, что в рамках принятой модели относительная амплитуда возмущения $\delta B/B$ определяется величиной параметра β .

Согласно [4] основной вклад в затухание БМЗ-колебаний корональных петель вносят ионная вязкость ν и электронная теплопроводность c . При этом суммарный декремент затухания равен

$$\gamma_\Sigma = \gamma_\nu + \gamma_c = \\ = \frac{1}{12\sqrt{2}} \sqrt{\frac{M}{m}} \frac{\omega^2}{v_{ei}} \beta \sin^2 \theta \left(1 + \sqrt{\frac{32M}{m}} \beta \cos^2 \theta \right).$$

Здесь M и m — массы иона и электрона, $\theta = \arctg(k_\perp/k_\parallel)$ — угол между направлением магнитного поля B и волновым вектором k , где продольное волновое число $k_\parallel \approx \pi/L$, в то время как попереч-

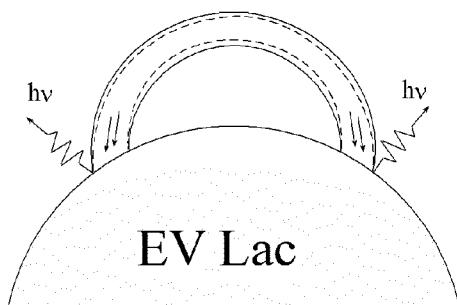


Рис. 1. Модель пульсаций вспышечного излучения на EV Lac

ное $k_{\perp} \approx j_0/a$. Эффективная частота столкновений электронов с ионами в (6) определяется выражением

$$v_{ei} = \frac{5.5n}{T^{3/2}} \ln \left(10^4 \frac{T^{2/3}}{n^{1/3}} \right) \approx 60 \frac{n}{T^{3/2}} \text{ с}^{-1}.$$

Полагая добротность колебаний $Q = \omega/\gamma_{\Sigma}$, из соотношений (2) и (6) получим формулы для определения параметров вспышечной плазмы (температуры T , концентрации частиц n и магнитного поля B) по периоду $P = P_{\text{свз}}$ и добротности Q , а также плазменному параметру β

$$T \approx 1.2 \cdot 10^{-8} \frac{\tilde{r}^2 \beta}{P^2 \chi},$$

$$n \approx 3.49 \cdot 10^{-13} \frac{\tilde{r}^3 \kappa \beta^{5/2} Q \sin^2 \theta}{P^4 \chi^{3/2}},$$

$$B \approx 3.81 \cdot 10^{-18} \frac{Q^{1/2} \tilde{r}^{5/2} \kappa^{1/2} \beta^{5/4} \sin \theta}{P^3 \chi^{3/4}},$$

где $\tilde{r} = 2\pi a/j_0$, $\kappa = 243\beta \cos^2 \theta + 1$.

Для того чтобы найти зависимость между глубиной Δ модуляции оптического излучения, вызванного потоком «высыпающихся» в основаниях вспышечной петли ускоренных электронов:

$$\Delta = (F_{\max} - F_{\min})/F = 2\delta F/F$$

($F_{\max} = F + \delta F$ и $F_{\min} = F - \delta F$ — максимальный и минимальный потоки модулированного излучения) и плазменным параметром β , будем исходить из модели коронального пробкотрона [11]. В рамках данного подхода вариации оптического излучения из оснований петли должны определяться изменением потока S пролетных частиц, причем $\delta F/F \approx \delta S/S \approx \delta B/B$. Отсюда согласно (5) и (10) получим

$$\Delta \approx \beta.$$

Как следует из результатов наблюдений [12] для события 11.09.98 (рис. 2) период $P \approx 13$ с, добротность $Q \approx 50$ и глубина модуляции $\Delta \approx 0.2$. Задавая $a/L = 0.1$, определяем $\theta \approx \arctg(j_0 L/\pi a) \approx 76^\circ$. С учетом этого, полагая $\tilde{r} = 2.62a \approx 2.62 \cdot 10^9$ см, из (7)–(11) находим температуру плазмы $T = 3.7 \cdot 10^7$ К, концентрацию частиц $n = 1.6 \cdot 10^{11}$ см⁻³, магнитное поле $B = 32$ мТл.

Особо подчеркнем, что в соответствии с принятой нами моделью характерная длина вспышечных петель на EV Lac $L \approx 0.4R_*$, тогда как на Солнце $L \approx 0.01R$. Кроме того, если задать радиус петли a равным 10^8 или 10^{10} см, из (7)–(11) получим либо слишком малые ($1.6 \cdot 10^8$ см⁻³), либо слишком большие ($1.6 \cdot 10^{14}$ см⁻³) значения концентрации n .

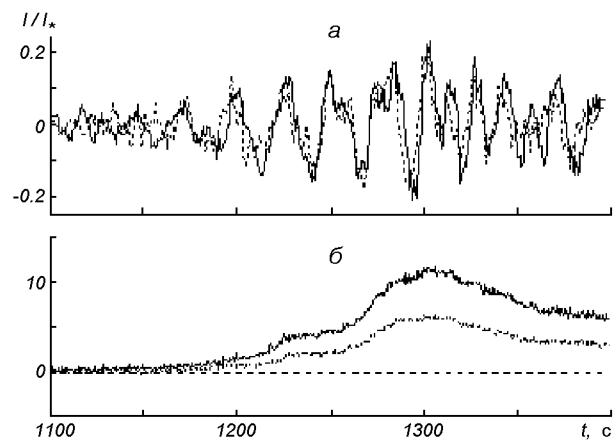


Рис. 2. Вверху — пульсации излучения EV Lac в полосе U (непрерывная линия) и B (точки) с периодом $P \approx 13$ с, вспышка 11 сентября 1998 г. [12]; внизу — кривая блеска в полосах U и B . Амплитуда в полосе B на обоих рисунках увеличена в пять раз

Интересно также отметить, что согласно предложению Маллена и др. [8] оптическое излучение вспышек может определяться тормозным излучением горячей плазмы корональной части петли, а не излучением в области оснований. В свете данной гипотезы мы сделали соответствующие оценки, воспользовавшись принятой нами моделью осцилляций. Оказалось, что при тех же значениях параметров, что и в предыдущем случае, температура корональной плазмы должна равняться $T \approx 9 \cdot 10^7$ К, концентрация $n \approx 10^{13}$ см⁻³ и магнитное поле $B \approx 0.2$ Тл. Поскольку корональные петли с $\beta \sim 1$ крайне неустойчивы по отношению к желобковым возмущениям, то гипотеза [8] о возможности локализации источника оптического излучения в корональной части петли представляется маловероятной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Наблюденные квазипериодические осцилляции вспышечного излучения на EV Lac мы связали с радиальными БМЗ-колебаниями корональных петель. Это позволило нам оценить основные параметры корональных петель по наблюдаемому периоду P , глубине модуляции Δ и добротности Q пульсаций излучения. В рамках предложенной нами модели было показано, что гипотеза Маллена и др. [8], в соответствии с которой оптическое излучение звезд определяется горячей вспышечной плазмой самой петли, сталкивается с трудностями.

Согласно наблюдениям [12] глубина модуляции

излучения в полосе U может в несколько раз превышать глубину модуляции в полосе B . По нашему мнению, данное обстоятельство обусловлено трансформацией энергии ускоренных частиц в тепловую, главным образом в верхних слоях нижней атмосферы звезд. Вследствие этого роль сглаженных тепловых потоков в нагреве более глубоких и холодных нижних слоев должна существенно возрасти, что и приводит к «замыванию» наблюдаемых осцилляций.

При поведении анализа мы пренебрегли влиянием модуляции испаряющейся плазмы на собственные колебания корональных петель. Это объясняется тем, что характерное время заполнения петли горячей плазмой τ значительно превышает период колебаний P . Действительно, принимая период $P = 10 \dots 30$ с, длину петли $L = 10^{10}$ см, а также считая скорость испаряющейся плазмы сравнимой со скоростью звука ($V_e = (1 \dots 3) \cdot 10^7$ см/с), получим $\tau \approx L/(2V_e) = 3 \dots 8$ мин, т. е. $\tau \gg P$.

В заключение отметим, что наблюдаемые в некоторых случаях минутные осцилляции оптического излучения вспыхивающих звезд с глубиной модуляции, не превышающей нескольких процентов, могут быть вызваны изгибными колебаниями петель. При этом их возбуждение должно определяться действием центробежной силы, возникающей в результате движения высокоскоростных потоков испаряющегося хромосферного вещества вдоль искривленных магнитных силовых линий.

Работа поддержана РФФИ (грант 03-02-17218 и частично 03-02-17357), ГНТП «Астрономия», Программой Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии» и Программами ОФН-16, ОФН-18. Ю. Г. Копылова благодарит Администрацию Санкт-Петербурга за финансовую поддержку (грант PD04-1.9-35).

1. Гершберг Р. Е. Активность солнечного типа звезд Главной Последовательности. — Одесса: Астропринт, 2002.—688 с.
2. Зайцев В. В., Степанов А. В. О происхождении пульсаций жесткого рентгеновского излучения. // Письма в Астрон. журн.—1982.—8, № 4.—С. 248—252.
3. Копылова Ю. Г., Степанов А. В., Цап Ю. Т. Радиальные

осцилляции корональных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 11.—С. 870—879.

4. Степанов А. В., Копылова Ю. Г., Цап Ю. Т. и др. Пульсации микроволнового излучения и диагностика вспышечной плазмы // Письма в Астрон. журн.—2004.—30, № 7.—С. 530—539.
5. Цап Ю. Т., Копылова Ю. Г. Механизм акустического затухания быстрых изгибных колебаний корональных петель. // Письма в Астрон. журн.—2001.—27, № 11.—С. 859—866.
6. Hawley S. L., Fisher G. H., Simon T., et al. Simulations Extreme-Ultraviolet Explorer and optical observations of AD Leonis: evidence for large coronal loops and the Neupert effect in stellar flares // Astrophys. J.—1995.—453, N 2.—P. 464—479.
7. Mullan D. J. On the possibility of resonant electrodynamic coupling in the coronae of red dwarfs // Astrophys. J.—1984.—282, N 2.—P. 603—611.
8. Mullan D. J., Herr R. B., Bhattacharyya S. Transient periodicities in X-ray-active red dwarfs: first results from Mount Cuba and interpretation with an oscillating loop model // Astrophys. J.—1992.—391, N 1.—P. 265—275.
9. Nakariakov V. M., Melnikov V. F., Reznikova V. E. Global sausage modes. // Astron. Astrophys.—2003.—412, N 1.—P. L7—L10.
10. Roberts B., Edwin P. M., Benz A. O. On coronal oscillations // Astrophys. J.—1984.—279, N 2.—P. 857—865.
11. Stepanov A. V., Tsap Y. T. Electron-whistler interaction in coronal loops and radiation signatures. // Solar Phys.—2002.—211, N 1.—P. 135—154.
12. Zhilyaev B. E., Romanyuk Ya. O., Verlyuk I. A., et al. Detection of high-frequency oscillations on the flare EV Lacertae. // Astron. Astrophys.—2000.—364, N 2.—P. 641—645.

CORONAL LOOPS AND PULSATIONS OF RADIATION FROM FLARE STARS

A. V. Stepanov, Yu. T. Tsap, Yu. G. Kopylova,
E. G. Kupriyanova

On the basis of the analogy between solar and stellar flares, the oscillations with periods of tens of seconds observed in the case of the EV Lac in the U and B bands are analyzed. We associated the pulsations of radiations with the fast magnetoacoustic oscillations of coronal arcs. The values of the magnetic field $B \approx 32$ mT, temperature $T \approx 3.7 \cdot 10^7$ K, and number density $n \approx 1.6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ in the region of the flare energy release are estimated. Some arguments in favour of localization of the optical radiation source at loop footpoints are obtained.

© В. В. Фиделис

Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

ВАРИАЦИИ СИНХРОТРОННОГО И ИНВЕРСНОГО КОМПТОНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ БЛАЗАРА 1ES 1959+650 В 2003 Г.

В 2003 г. при спостереженнях на черенковському телескопі ГТ-48 було зареєстровано надлишок гамма-квантів надвисоких енергій у напрямку блазара 1ES 1959+650 на рівні 30 % величини потоку від Крабовидної туманності ($E > 1$ ТeВ) зі статистичною вірогідністю 4.4 σ . Аналіз даних спостережень показав кореляцію інтенсивності випромінювання в діапазоні енергій понад 1 ТeВ з випромінюванням в діапазоні 2—10 кeВ за даними реєстрації детектором ASM на борту космічної обсерваторії RXTE.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительным свойством галактик из каталога EGRET [4] является наличие активных ядер блазарного типа, в которых релятивистские струи предположительно ориентированы в направлении наблюдателя. Они могут быть наиболее вероятными источниками гамма-квантов сверхвысоких энергий (СВЭ), генерируемых за счет обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах. Большая светимость ряда таких объектов в гамма-диапазоне и быстрая ее переменность могут быть обусловлены анизотропией излучающих областей, связанной с особенностями их движения вдоль релятивистских струй, выбрасываемых из их активных ядер.

Блазар 1ES 1959+650 ($z = 0.047$) принадлежит к этому классу объектов, и от него сравнительно недавно был обнаружен поток гамма-квантов СВЭ энергий [2]. В связи с сильной переменностью (вариации излучения до 3 Crab) этот объект подвергнут в настоящее время интенсивным наблюдениям. Объект наименее изучен по сравнению с ранее обнаруженными источниками излучения СВЭ — Mrk 421 и Mrk 501, имеющими обширную наблюдательную статистику разных обсерваторий [6, 7].

Спектральное распределение энергии блазаров характеризуется двумя широкими пиками, первый из которых, расположенный от радио- до ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов, обычно интерпретируется как синхротронный компонент излучения, а второй, достигающий в некоторых случаях энергий порядка 10^{12} эВ — как инверсный комптоновский [3]. Исследование видов корреляции излучения в диапазонах энергий, совпадающих

с этими двумя пиками, немаловажно с точки зрения определения природы излучения блазаров эти- ми доминирующими радиационными процессами.

ЧЕРЕНКОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП И НАБЛЮДЕНИЯ

Блазар 1ES 1959+650 наблюдался в продолжение 22 безлунных ночей в период с 3 июня по 30 августа 2003 г. при зенитных углах, не превышающих 28° , по методу слежения за объектом путем сопоставления результатов наблюдения источника гамма-квантов в течение 45 мин (режим ON) с результатами наблюдений фона той же длительности (режим OFF) со сдвигом по прямому восхождению относительно друг друга на 50 мин.

Наблюдения осуществлялись на телескопе ГТ-48, позволяющем строить стереоскопические изображения черенковских вспышек от широких атмосферных ливней (ШАЛ), генерируемых гамма-квантами СВЭ на высотах порядка 8—10 км. Он расположен на высоте 600 м выше уровня моря и состоит из двух идентичных альт-азимутальных монтировок (секций), расположенных друг от друга на расстоянии 20 м в направлении север—юг. Каждая секция оборудована четырьмя 37-канальными камерами с полем зрения 2.6° каждая. Каждая камера установлена в общем 5-м фокусе четырех зеркал диаметром 1.2 м. Общая площадь составных зеркал на двух секциях телескопа составляет 36 м^2 . Сигналы от четырех камер на каждой секции поканально складываются. Вспышки регистрируются в том случае, если амплитуды сигналов любых двух каналов превышают установленный порог. Обе секции телескопа работают в режиме совпадения, что практически исключает регистрацию событий от заряжен-

ных частиц. Временное разрешение схемы совпадения составляет 15 нс. Секции телескопа управляются системой ведения с точностью позиционирования $\pm 0.05^\circ$. Эффективная пороговая энергия регистрации первичных гамма-квантов составляет около 1 ТэВ, угловое разрешение 0.1° . Телескоп подробно описан в работе [1].

Сеансы наблюдений, проводимые при плохих погодных условиях, исключались из рассмотрения. Критерием отбора являлась низкая скорость регистрации вспышек или ее большая неравномерность при наблюдениях источника и фона. Общее время качественного наблюдения объекта с июня по август 2003 г. составило 17 ч и 15 мин.

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Черенковские телескопы могут детектировать черенковские вспышки от ШАЛ, инициируемых как гамма-квантами СВЭ, так и космическими лучами (КЛ), преимущественно протонами. Принцип выделения полезного сигнала, составляющего 0.1 % от фона ШАЛ, образуемых КЛ, основан на разнице изображений черенковских вспышек и их ориентации относительно направления на предполагаемый источник гамма-квантов. Вспышки от КЛ имеют относительно большие угловые размеры, флюктуирующие изображения и распределены изотропно. Изображения же вспышек, образованных гамма-квантами, имеют более малые и компактные изображения, вытянутые в направлении на источник.

При отборе вспышек в первую очередь рассматривалась суммарная амплитуда вспышки V . Поскольку параметры вспышек малой амплитуды определяются с большой ошибкой, они исключались из дальнейшего рассмотрения. Вспышки с амплитудой, меньшей 75 единиц дискрета (52 фотоэлектрона) для каждой секции телескопа исключались из рассмотрения.

Отбор по форме изображений осуществлялся с использованием параметра IPR. Он характеризует степень фрагментации изображений вспышек и ему приписываются значения 0 для компактных изображений и 1...7 для более разрозненных. Практически при отборе значения параметра IPR не превышают 1.

Вспышки также отбирались по их размерам вдоль большой оси (*length*) и в перпендикулярном направлении (*width*), а учет ориентации вспышек относительно источника осуществлялся с применением параметров *miss* (перпендикулярное расстояние от источника до оси изображения) и *dist* (угловое расстояние от положения источника в

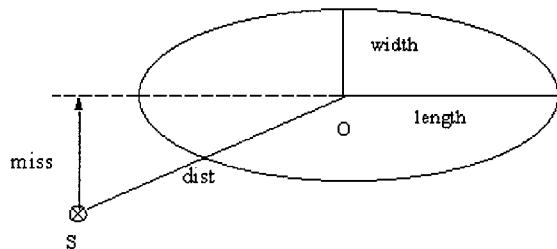


Рис. 1. Графическое изображение параметров вспышки, используемых при отборе: O — центр распределения яркости вспышки, S — положение источника

фокальной плоскости до центра тяжести изображения вспышки) [5]. Схематично указанные параметры отбора показаны на рис. 1.

Границочные значения параметров отбора подбирались таким образом, чтобы величина эффекта Q была максимальна:

$$Q = \frac{ON - OFF}{\sqrt{ON + OFF}}, \quad (1)$$

где обозначения *ON* и *OFF* соответствуют количеству зарегистрированных вспышек при наблюдении источника и фона. Выражение в числителе представляет собой разность числа зарегистрированных вспышек при наблюдениях источника и фона, эквивалентной числу черенковских вспышек от гамма-квантов, а выражение в знаменателе — статистическую ошибку. Количество зарегистрированных и отобранных событий, а также эффект отбора представлены в таблице.

Среднее значение потока за период наблюдений составило примерно 0.3 Crab (единица потока, обозначенная «Crab», соответствует потоку от Крабовидной туманности). Распределения направлений прихода гамма-квантов и их интенсивности показаны на рис. 2, где $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ — отклонения от координат источников по прямому восхождению и склонению (в градусах).

Несмотря на то, что в целом за период наблюдений вариации излучения от объекта не выходят за пределы ошибок, он может характеризоваться наличием двух состояний — спокойного и возмущенного, что отражено на среднесуточной световой

Статистика отбора. Отбор по параметру *miss* проводился в сочетании с отбором по параметру *dist*

Метод отбора	ON	ON-OFF	Q, σ
Без отбора	11024	166	1.12
Отбор по V , IPR, <i>length</i> и <i>width</i>	373	116	4.62
Отбор по <i>miss</i> $< 0.205^\circ$	116	58	4.40

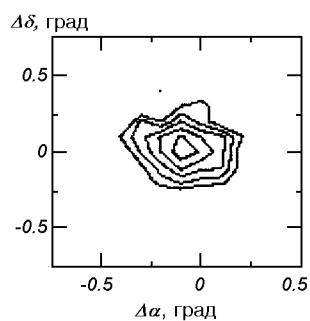


Рис. 2. Изофоты распределения прихода гамма-квантов в направлении блазара 1ES 1959+650 ($E > 1$ ТэВ). Внешняя изофота соответствует 25 событиям, шаг изофот — 7 событий. Максимум прихода гамма-квантов СВЭ соответствует $(-0.1, 0.0)$

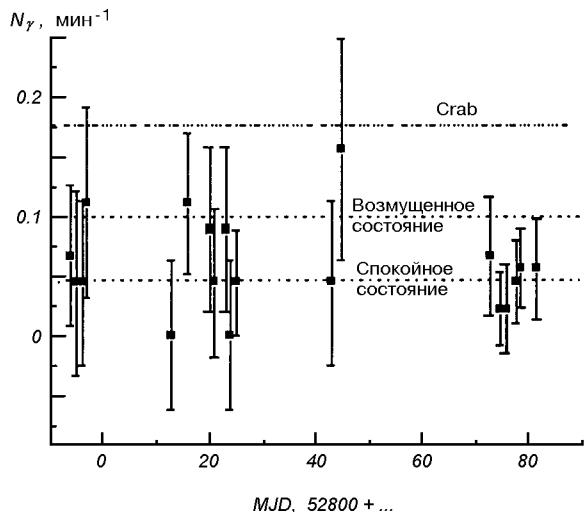


Рис. 3. Временной ход потока гамма-квантов с энергией выше 1 ТэВ от блазара 1ES 1959+650. Ошибки — статистические

кривой объекта в диапазоне энергий выше 1 ТэВ (рис. 3). Если исключить из рассмотрения нулевые значения потока и максимальное его значение 24 июля (MJD52845) на уровне 0.9 Crab (1.7σ), то для спокойного состояния будем иметь значение потока на уровне 0.3 Crab (3.16σ), а для возмущенного — 0.6 Crab (2.85σ).

КОРЕЛЛЯЦИЯ С ИЗЛУЧЕНИЕМ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИПАЗОНЕ

Сопоставление вариаций излучения от блазара в диапазонах энергий выше 1 ТэВ и 2–10 кэВ показало наличие общих тенденций в спаде и возрастании потоков (рис. 4).

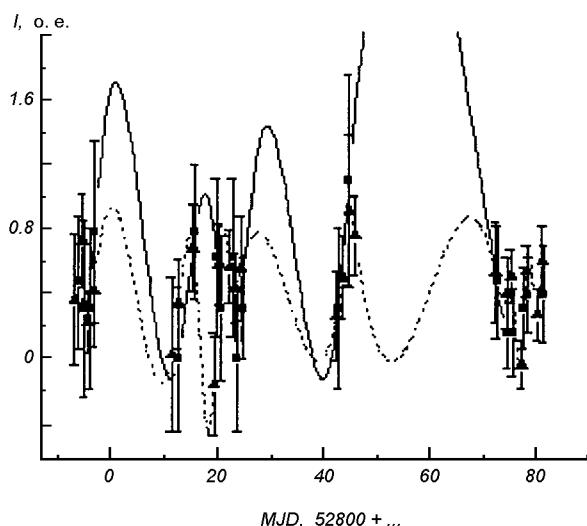


Рис. 4. Среднесуточные вариации излучения блазара 1ES 1959+650 в диапазонах энергий выше 1 ТэВ (квадратики) и 2–10 кэВ (треугольники) (quick-look results provided by ASM/RXCTE team). Промежутки в световых кривых совпадают с периодами яркой Луны

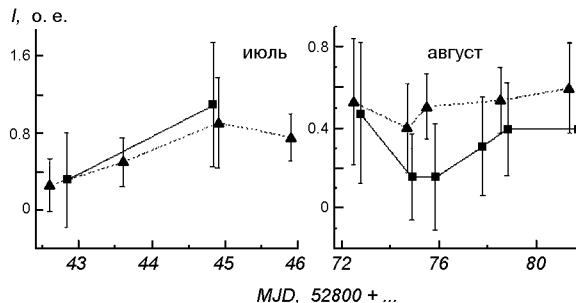


Рис. 5. Фрагменты вариаций излучения блазара 1ES 1959+650 в диапазонах 2–10 кэВ (треугольники) и выше 1 ТэВ (квадратики) в отдельные «безлуные» периоды

Детальный визуальный анализ световых кривых в разные «безлуные» периоды также показывает наличие признаков подобия их элементов (рис. 5). В целом поток от объекта в ТэВ-диапазоне имел тенденцию к уменьшению от июня к августу. В рентгеновском диапазоне наблюдались три вспышки с 3–4-кратным превышением потока относительно спокойного состояния, не совпадающие по времени с наблюдениями в ТэВ-диапазоне.

ВЫВОДЫ

Точечный источник гамма-квантов СВЭ может быть идентифицирован с галактикой 1ES 1959+650 со статистической достоверностью 4.4 стандартных

отклонений. Объект может характеризоваться наличием двух состояний на близких уровнях статистической достоверности — спокойным и возмущенным с превышением потока относительно спокойного приблизительно в два раза. На основании подобия световых структур в ТэВ- и кэВ-диапазонах можно предположить, что оба компонента излучения образуются в пределах одной области релятивистской струи за счет синхротронного и обратного комптоновского рассеяния на одних и тех же распределениях релятивистских электронов, что соответствует SSC-моделям, рассматриваемым, в частности, в работе [8].

1. Владимирский Б. М., Зыскин Ю. Л., Корниенко А. П. и др. Принципы расчета и описание гамма-телескопа 2-го поколения ГТ-48 // Изв. Крымской астрофиз. обсерватории.—1994.—91.—С. 74—105.
2. Aharonian F., Akhperjanian A., Beilicke M., et al. Detection of TeV GAMMA-rays from the BL Lac 1ES 1959+650 in its Low States and During a Major Outburst in 2002 // Astron. and Astrophys.—2003.—406, N 1.—P. L9—L13.
3. Costamante L., Ghisellini G. TeV Candidate BL Lac Objects // Astron. and Astrophys.—2002.—384, N 1.—P. 56—71.
4. Hartman R. C., Bertsch D. L., Bloom S. D., et al. The Third EGRET Catalog of High-Energy GAMMA-ray Sources // Astrophys. J. Supl. Ser.—1999.—123.—P. 79—202.

5. Hillas A. M. Cerenkov Light Images of EAS Produced by Primary GAMMA rays and by Nuclei // 19th International Cosmic Ray Conf., La Jolla, USA August 11—23.—1985.—P. 445—448.
6. Punch M., Akerlof C. W., Cawley M. F., et al. Detection of TeV Photons from the Active Galaxy Markarian 421 // Nature.—1992.—358.—P. 477—478.
7. Quinn J., Akerlof C. W., Biller S., et al. Detection of GAMMA rays with $E > 300$ GeV from Markarian 501 // Astrophys. J.—1996.—456—P. L83—L86.
8. Stecker F. W., De Jager O. C., Salomon M. H. Predicted Extragalactic TeV GAMMA-Ray Sources // Astrophys. J.—1996.—473.—P. L75—L78.

VARIATIONS OF SYNCHROTRON AND INVERSE COMPTON RADIATION FROM THE BLAZAR 1ES 1959+650 IN 2003

V. V. Fidelis

In 2003, with the use of Cherenkov telescope GT-48, it was detected an excess flux of very-high-energy gamma-quanta in a direction to the blazar 1ES 1959+650 at a level of about 30 % of the flux from Crab Nebula ($E > 1$ TeV) at 4.4σ . Our analysis of observed data showed the correlation of the emission intensity at $E > 1$ TeV with the emission in the energy band from 2 to 10 keV accordingly to ASM/RXTE data.

© О. А. Минин¹, В. Ф. Лобанов², В. П. Якубовский²

¹Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»
²Кримська лазерна обсерваторія ГАО НАН України

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ИСКУССТВЕННЫМИ СПУТНИКАМИ ЗЕМЛИ ДЛЯ СТАНЦИИ «КАЦИВЕЛИ-1893»

Описано новий пристрій керування приводом телескопа серії «Крим», що забезпечує автоматизований супровід спостережуваних об'єктів у реальному часі.

В 2003 году на станции «Кацивели-1893» вышло из строя устройство управления приводом лазерного телескопа(УУПТ). Оно было выполнено в виде блоков для крейта САМАС и через ISA(Industry-Standard Architecture) интерфейс подключено к управляющей ЭВМ. Ремонт устаревшего устройства не имел смысла, поэтому было принято решение о создании нового УУПТ. Вновь создаваемое УУПТ должно обеспечивать выполнение следующих основных функций:

- управление приводом двигателей телескопа;
- управление вращающимся зеркалом;

- согласование ЭВМ со службой времени;
- обеспечение работы с внешним пультом коррекции телескопа с учетом следующих требований:
 - подключение к современным ЭВМ типа IBM PC-AT/ATX;
 - автоматический поиск неисправностей устройства;
 - дешевизна и оперативность изготовления УУПТ.

При создании устройств, подключаемых к современным ЭВМ, очень остро стоит вопрос об аппаратном интерфейсе, особенно в случае, когда необхо-

Рис. 1. Схема подключения устройства к ATA-интерфейсу

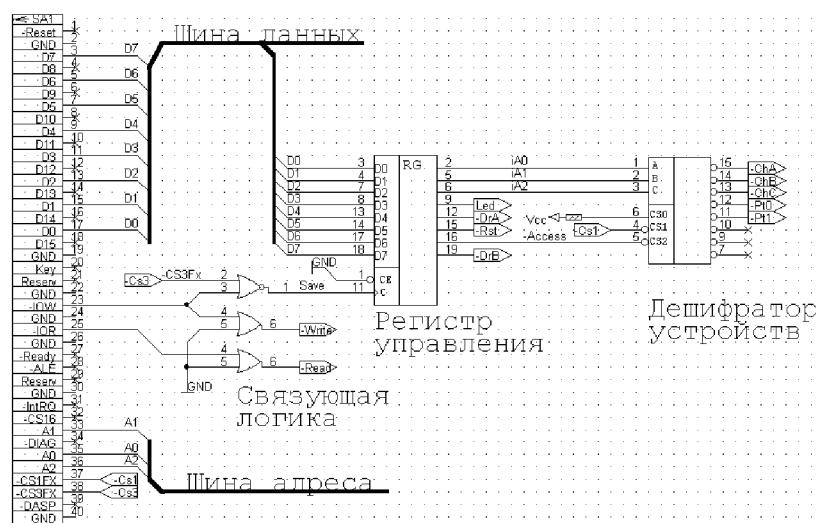
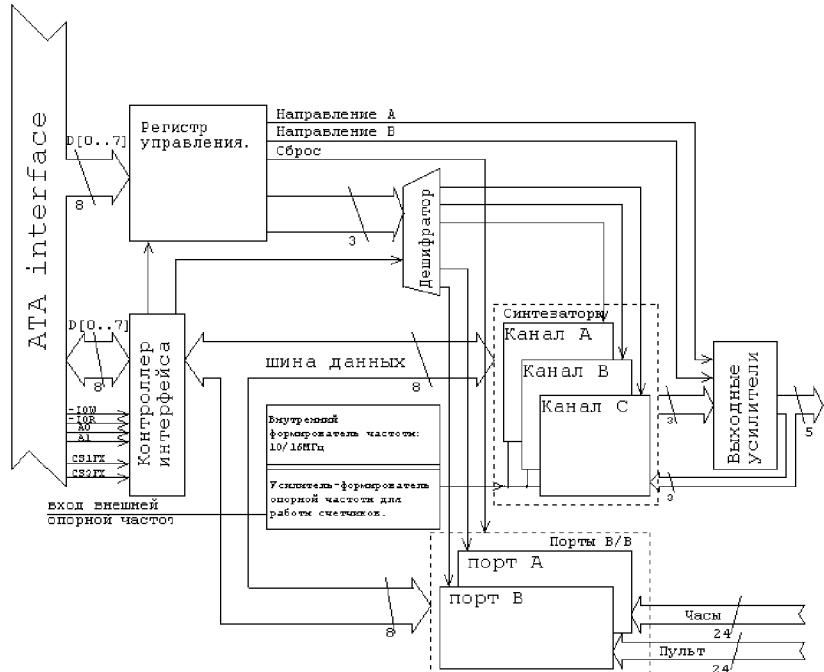


Рис. 2. Блок-схема УУПТ



димо подключить устройство, собранное на старой, но дешевой или имеющейся в наличии элементной базе, к персональным ЭВМ от «Pentium-II» и выше. Эти проблемы заключаются в том, что старые микросхемы не отвечают современным требованиям быстродействия, не могут питаться от низковольтных источников питания (3.3В, 2.5В). Кроме того, все современные интерфейсы обязывают поддерживать достаточно сложные протоколы автономизации устройств. Разработчик новой аппаратуры становится перед проблемой подключения даже простого разрабатываемого устройства к довольно сложной PCI шине (Peripheral Component Interconnect), которая пришла на замену EISA.

После проведения анализа всех доступных интерфейсов был найден оригинальный выход, который позволяет работать со «старой» 5В-логикой. ATA-интерфейс (Advanced Technology Attachment) остался практически неизмененным со времен 80286-процессоров, то есть первых IBM-PC-AT, для него не обязательна сложная процедура PnP-инициализации (plug and play). Все, что необходимо, этот аппаратный интерфейс имеет: совместимость со стандартной (5В) ТТЛ-логикой, несколько режимов работы — PIO-2, 3, 4, которые позволяют работать на разных скоростях обмена данными, и практическое отсутствие необходимости реализации сложных схем дешифрации адресов. Схема

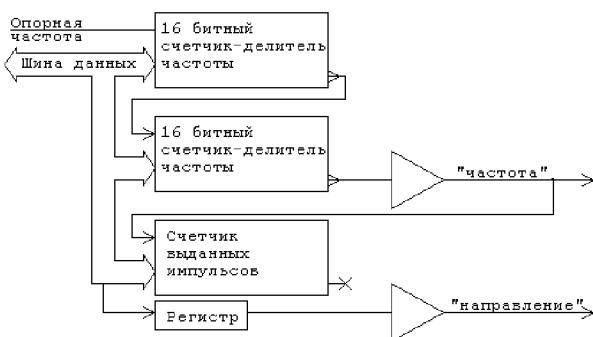


Рис. 3. Схема одного канала синтезатора

сопряжения настолько проста, что состоит всего из трех ТТЛ-микросхем стандартной серии 1531 (см. рис. 1).

Выбранное решение имеет свои ограничения, связанные, например с тем, что при таком подключении приходится использовать полностью вторичный (secondary) шлейф для подключения ATA-устройств. Для правильной работы с такой схемой в БИОСе компьютера нужно выставить протокол обмена PIO-2. Данная методика проверена более чем на 10 различных компьютерах с процессорами от 80386 до «Pentium-IV». В ходе проверки проблемы возникли только на одном РС. Проблему удалось решить за счет установки дополнительного контроллера ATA-устройств.

Выбранный интерфейс также очень прост с точки зрения разработки программного обеспечения: не требует реализации сложных протоколов обмена данными (достаточно знать базовый адрес устройства и адресацию логических устройств внутри схемы), что в свою очередь ускоряет адаптацию программного обеспечения для работы с УУПТ.

Разработанное устройство размещено внутри HDD-RACK для накопителя 3.5", что также позволяет устанавливать устройство, не разбирайая компьютера, не нарушая гарантии на ПЭВМ.

Блок-схема УУПТ приведена на рис. 2. УУПТ состоит из таких частей:

- контроллер интерфейса,
- формирователь опорной частоты,
- синтезаторы частот — три идентичных канала управления ПШД,
- два порта ввода/вывода,
- выходные усилители на ПШД.

Опорная частота для синтезаторов частоты может формироваться как самой схемой, так и браться извне, например со стандарта частоты и времени. Возможные значения для опорных частот:

- внутренние источники: 10 и 16 МГц (выбор

таких источников не случаен: используемая логика 82C54 может работать на частотах до 10МГц, однако чем выше опорная частота, тем точнее можно выбирать скорость двигателей. Экспериментально установлено, что можно уверенно работать на частоте 16 МГц);

— внешние: 2 и 5 МГц — синусоида размахом 1 В (стабильность работы кварцевых генераторов обычно составляет 10 мкс, что соответственно вносит некомпенсируемую ошибку опорной частоты. Поэтому в схему добавлена возможность использования точных опорных частот, например с атомных часов).

Каждый из трех каналов — синтезаторов частоты состоит из трех управляемых 16-битных счетчиков-делителей (рис. 3), которые помещены внутри микросхемы типа 82C54A.

Схема каждого канала содержит обратную связь, что позволяет тестировать работоспособность канала и вести учет числа импульсов выданных на привод двигателей.

Канал С предназначен для управления врачающимся зеркалом, поэтому не может управлять направлением движения.

Синтез частоты в УУПТ реализуется за счет двухкаскадного деления опорной частоты:

$$f_p = \frac{f_{\text{оп}}}{k_1 k},$$

где $f_{\text{оп}}$ — опорная частота УУПТ, k_1 , k — коэффициенты деления первого и второго каскадов синтезатора частоты, f_p — управляющая частота для привода телескопа.

Для упрощения изложения будем полагать $k_1 = 2$ и определив опорную частоту $f_0 = f_{\text{оп}}/k_1$ выходного каскада, получим

$$f_p = \frac{f_0}{k}, \quad (1)$$

Указанное преобразование является дискретным из-за квантования коэффициента деления k , и получить произвольную управляющую частоту невозможно.

Разность между соседними значениями спектра частот:

$$\Delta f = -f_p - f_{p+1} = \frac{f_0}{k_p} - \frac{f_0}{k_{p+1}} = \frac{f_0}{k_p^2 + k_p}, \quad (2)$$

где Δf — разность между соседними значениями в спектре частот, f_p , f_{p+1} — соседние частоты спектра, k_p , k_{p+1} — коэффициенты деления для частот f_p , f_{p+1} соответственно, $k_p - k_{p+1} = 1$.

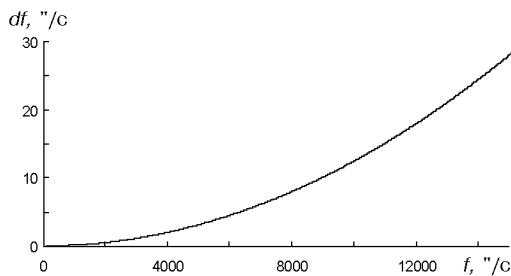


Рис. 4. График зависимости Δf от управляемой частоты

Заметим, что Δf уменьшается при больших значениях k_p .

Заменим в выражении (2) k_p , используя (1):

$$\Delta f = \frac{f_n^2}{f_0 + f_p}.$$

Анализ выражения показывает, что Δf уменьшается при увеличении величины опорной частоты f_0 и уменьшении требуемой управляемой частоты f_p .

На рис. 4 изображена зависимость максимальной Δf от величины управляемой частоты f_p . В расчетах взята максимальная опорная частота f_0 второго каскада синтезатора 8 МГц.

Видно, что на высоких скоростях движения телескопа (скорость определяется величиной управляемой частоты) вблизи 11000"/с ($\approx 3^\circ/\text{с}$) Δf составляет около 15"/с. Такое отклонение скорости от требуемой будет существенно влиять на точность сопровождения объекта и определяет границу применимости устройства.

Порты ввода-вывода (ПВВ) не являются специализированными и могут использоваться для ввода-вывода любой информации. Общая разрядность ПВВ — 48 бит или 2×24 бита. Один из портов схемы используется для чтения точного времени с внешних часов, второй порт на данный момент задействован частично и используется для работы с пультом управления телескопа.

Полное автоматическое тестирование устройства включает:

- автоматическое определение подключения устройства к компьютеру;

Успешные сеансы наблюдений

Спутник	Дата, 2004 г.	Количество пролетов	Количество нормальных точек
AIIISAI	15.04—06.09	68	1021
BE-C	09.04—17.09	45	1089
CHAMP	14.09—01.10	3	48
ENVISAT	01.04—21.09	59	928
ERS-2	09.04—15.09	65	919
ETALON-2	28.05—28.05	1	4
GFO-1	19.04—12.10	19	273
GLONASS-84	21.05—20.09	3	13
GLONASS-87	17.09—17.09	1	4
GRASE-A	24.05—13.07	7	104
GRASE-B	03.07—03.07	1	14
JASON	01.04—24.08	31	673
LAGEOS-1	31.03—12.10	62	439
LAGEOS-2	31.03—12.10	41	300
LARETS	27.05—04.08	5	20
STARLETTE	31.03—15.09	43	409
TOPEX	01.04—31.08	46	1111
ВСЕГО		500	7369

- автоматическое определение наличия рабочих частей схемы (микросхем);
- автоматическое определение поданной опорной частоты, ее величины;
- определение работоспособности выходных усилителей, подсчет выданных импульсов.

В случае успешного прохождения всех предложенных тестов работоспособность устройства гарантирована. Для обнаружения неисправностей устройства написана тестовая программа, позволяющая находить все программно-тестируемые неисправности.

Наблюдения с использованием УУПТ начались в марте 2004 г. На данный момент произведено 500 успешных сеансов (см. таблицу) (<http://cddisa.gsfc.nasa.gov>).

THE MODERN SYSTEM FOR TRACKING OVER ARTIFICIAL EARTH SATELLITES AT THE «KATSIVELI-1893» STATION

O. A. Minin, V. F. Lobanov, V. P. Yakubovskiy

We describe a new control device for a telescope of the "Crimea" type which ensures the real time tracking over artificial Earth satellites.

© В. П. Епишев, И. И. Исак, И. И. Мотрунич, Э. И. Новак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И ПРИРОДЫ ВОЗМУЩЕНИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВРАЩЕНИЕ ИСЗ

Описано метод оцінювання та дослідження негравітаційних збурень, що діють на обертання ІСЗ. Він базується на високоточному визначенні періоду власного обертання і орієнтації некерованих космічних об'єктів. Метод реалізовано на результатах спостережень за ІСЗ серії «Мідас» (висота польоту 3700 км) і «Метеор» (860 км). Форма супутників є комбінацією циліндра та двох панелей сонячних батарей; у КА «Метеор» ще є параболічна антена.

В Лаборатории космических исследований УжНУ осуществлен нетрадиционный подход к определению величины возмущений со стороны физических полей околоземного комического пространства, влияющих на вращение ИСЗ произвольной формы. Он базируется на высокоточном определении периода собственного вращения и ориентации неуправляемых космических аппаратов (КА) по результатам комплексных (позиционных и фотометрических) наблюдений астрономическими средствами. Разработанные методики позволяют оценивать направления основных осей неуправляемых КА с точностью до 1.0° и фиксировать изменения периода его собственного вращения порядка 0.1 с и меньше. Поэтому предлагаемый метод дает возможность определять реально действующие на КА возмущения, так как усреднение найденных величин проводится на интервале одного наблюдения (5—8 мин), а их значения сравниваются на двух последующих прохождениях ИСЗ или через сутки. Для общепринятого метода оценки возмущений, базирующегося на контроле изменений элементов

орбиты, требуются интервалы времени наблюдений, на два-три порядка большие.

Именно благодаря высокоточным фотометрическим наблюдениям изменений периода собственно го вращения американского ИСЗ «Мидас-4», летающего на высоте порядка 3750 км над поверхностью Земли, нам удалось обнаружить четкую корреляцию между этим изменением и изменением солнечной активности [3, 4], что показано на рис. 1, 2.

В данной задаче спутник представляется в качестве гироскопа. Знание ориентации ИСЗ и параметров его вращения позволяет рассчитать момент количества движения L (кинетический момент) или гироскопический момент K , и по их изменению на выбранных интервалах времени оценить величину возмущений M_L :

$$L = I \cdot \omega, \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi i / P_0. \quad (2)$$

где I — момент инерции, ω — угловая скорость собственного вращения ИСЗ, P_0 — период собст-

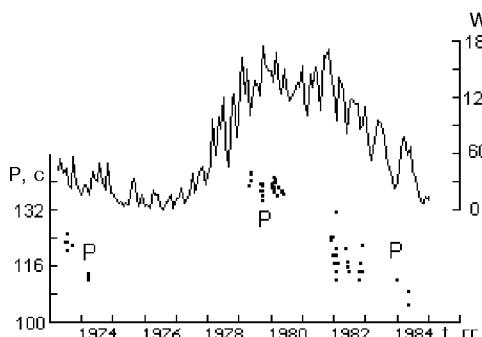


Рис. 1. Изменение периода P собственного вращения ИСЗ «Мидас-4» и чисел Вольфа W солнечной активности на протяжении 1973—1984 гг.

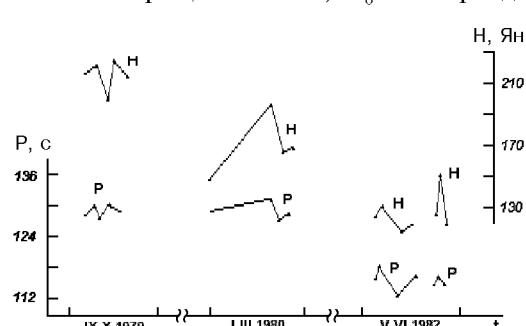


Рис. 2. Фрагменты сопоставления солнечной активности H на $\lambda = 10.7$ см и периодов P собственного вращения ИСЗ «Мидас-4» на отдельные моменты наблюдений

венного вращения.

Гирокомпенсаторный момент в i -е моменты времени представим в виде

$$K_i = L_i \omega_{\text{пр}} \sin \beta_i, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{пр}}$ — угловая скорость прецессии, β — угол между осью вращения и направлением приложения силы.

Отсюда возмущающий момент можно оценить соотношением

$$M_L = dL/dt. \quad (4)$$

К сожалению, величина M_L есть сумма всех действующих на КА возмущений в рассматриваемом временном интервале, которая не дает четкого представления о природе этих возмущений и их взаимодействии. Разделение суммарного возмущающего момента на составляющие его компоненты, обусловленные природой явления, и предопределяет конечную цель поставленной задачи.

В зависимости от высоты полета спутника, его веса и формы, внутреннего устройства, число компонентов и их значимость будет разной [2]. Поэтому в одном случае достаточно учесть воздействие на поверхность ИСЗ только потока излучения от Солнца, а в другом — еще и влияние со стороны земной атмосферы или магнитного поля Земли.

Исходя из накопленного опыта, мы пришли к выводу, что для спутника сложной формы (корпус, панели солнечных батарей, антенны и т. п.) решение задачи лучше проводить фрагментарно. То есть, действие тех или иных возмущений на каждый из основных элементов поверхности КА определять отдельно, в зависимости от ориентации фрагмента поверхности относительно направления на предполагаемый источник возмущений. А характер взаимодействия прямого и отраженного от земной поверхности солнечного излучения с фрагментами поверхности КА определять путем расчета соответствующих фазовых функций, которые вводятся в значение величины эффективной площади рассеивания набегающих потоков фрагментом поверхности ИСЗ. На конечном этапе суммируются значения всех фрагментарных возмущений, и проводится их сравнительное сопоставление с величиной M_L .

В зависимости от формы спутника число фрагментов может быть разным. Так поверхность ИСЗ серии «Мидас» (рис. 3) мы разделили на два независимых фрагмента: цилиндр (корпус) и плоскость (панели солнечных батарей). Для объекта «Метеор» (рис. 4) выделено три фрагмента: цилиндр (корпус), плоскость (панели солнечных батарей) и вогнутый овал (антенна).

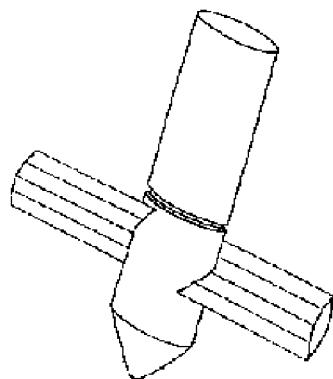


Рис. 3. Макет ИСЗ «Мидас-4»

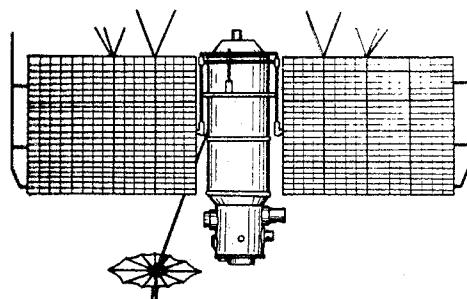


Рис. 4. ИСЗ «Метеор»

Возмущающий момент, порожденный прямым солнечным излучением, определялся нами как

$$M_\Theta = \frac{A_0 S_{\Theta} \cdot r}{c}, \quad (5)$$

где A_0 — солнечная постоянная, c — скорость света, r — плечо приложенной силы, S_{Θ} — суммарная площадь эффективного сечения ИСЗ [5].

Для ИСЗ «Мидас» ее можно представить суммой

$$S_{\Theta} = F_1 S_1 + F_2 S_2, \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} [\sin \psi + (\pi - \psi) \cos \psi] \sin \varepsilon_1 \sin \theta_1, \quad (7)$$

$$F_2 = \cos \varepsilon_2 \cos \theta_2, \quad (8)$$

где F_1 , F_2 , — соответственно фазовые функции, описывающие рассеивание света от цилиндра и от плоскости, S_1 — площадь сечения корпуса ИСЗ, S_2 — площадь панелей солнечных батарей, ψ — фазовый угол; ε_1 и θ_1 — углы падения и отражения света относительно продольной оси корпуса спутника, ε_2 и θ_2 — углы падения и отражения относительно нормали к панели солнечной батареи.

Для ИСЗ серии «Метеор» в формуле (6) добавля-

ется еще один член F_3S_3 , учитывающий рассеяние света антенной.

Влияние на вращение ИСЗ теплового и отраженного солнечного излучения от поверхности Земли рассчитывалось по методике, детально описанной в работе [1], с учетом ориентации фрагментов поверхности исследуемого спутника к направлению излучения.

Аэродинамический момент определялся как

$$M_a = F_a r, \quad (9)$$

где r — плечо приложения силы лобового сопротивления F_a , которую мы рассчитывали согласно [2] по формуле

$$F_a = -\rho V_0^2 \int_S \left(2\varepsilon C^3 + (1-\varepsilon) \frac{u}{V_0} C^2 + (1-\varepsilon) C \right) dS. \quad (10)$$

Здесь $C = (\mathbf{e}_{V_0} \cdot \mathbf{n}) = n_y \sin \delta + n_z \cos \delta$ — косинус угла между нормалью и направлением вектора движения ИСЗ, V_0 — орбитальная скорость ИСЗ, ρ — плотность атмосферы, u — скорость движения молекул атмосферы, ε — доля зеркально отраженных от поверхности ИСЗ молекул, S — площадь попечного сечения спутника.

Метод опробован на четырех космических аппаратах серий «Мидас» и «Метеор». Полученные результаты подтвердили, что для объектов серии «Мидас» (высота полета 3500—3780 км) достаточно рассматривать влияние двух возмущающих моментов, порожденных прямым солнечным излучением и излучением от земной поверхности. Для объектов серии «Метеор» (высота 860 км) необходимо учитывать как минимум четыре источника возмущений — кроме двух вышеназванных, еще аэродинамический момент и возмущение со стороны магнитного поля Земли. Причем последние два момента являются преобладающими. Если вращение спутников «Мидас» на протяжении всего этапа исследо-

ваний происходило стablyно вокруг их продольных осей, реагируя только на изменения потока солнечного излучения, то КА «Метеор» вращался в двух разных режимах. Постоянно испытывая торможение (рис. 5), вращение вначале осуществлялось вокруг направления близкого к направлению «спутник — центр Земли», с медленным разворотом корпуса ИСЗ вокруг направления вектора его движения. А с конца 1979 года данный объект вошел в режим «кувыркания», что довольно ощутимо сказалось на величине его момента инерции и влияния на вращение спутника аэродинамического и магнитного моментов (рис. 6).

В табл. 1 приведены результаты исследований по ИСЗ серии «Мидас»: период собственного вращения ИСЗ, поток солнечного излучения на $\lambda = 10.7$ см, момент количества движения ИСЗ, гироскопический момент K , его изменение, значения возмуще-

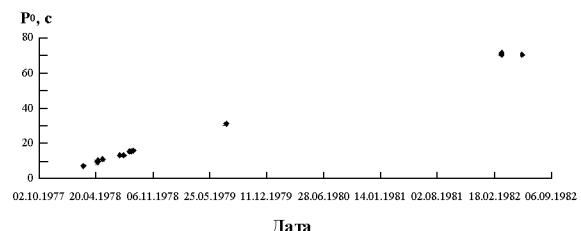


Рис. 5. Изменение периода собственного вращения ИСЗ «Метеор» со временем

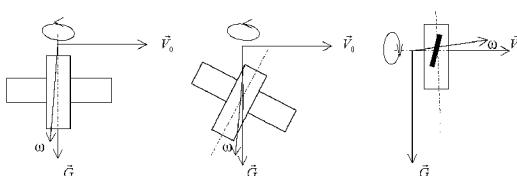


Рис. 6. Изменение положения оси собственного вращения и продольной оси ИСЗ относительно основных орбитальных осей

Таблица 1. Результаты определения величины возмущений, действующих на вращение ИСЗ серии «Мидас»

ИСЗ	Дата	P, с	H, 10^{-22} Вт/(м 2 Гц)	L, кг·м/с	K, мН·м	M_L , мкН·м	M_3 , мкН·м	M_O , мкН·м
«Мидас-3»	18.03.82	96.4	180	30.6561	3.160	—	3.4	20.2
	23.03.82	97.5	116	30.3166	3.123	23.4	3.2	22.4
	24.03.82	98.8	113	30.5421	3.145	—	2.5	23.7
«Мидас-4»	23.03.82	113.6	117	25.2714	2.528	18.0	2.3	16.3
	24.03.82	112.6	113	25.4958	2.546	—	2.3	15.4
	25.03.82	113.5	115	25.2937	2.528	18.0	2.4	18.2
«Мидас-7»	22.03.82	124.1	126	22.7095	2.238	11.0	2.2	18.7
	23.03.82	123.6	117	22.8050	2.248	04.3	1.8	25.9
	24.03.82	123.5	115	22.8272	2.252	37.8	2.2	20.1
	24.03.82	121.6	112	23.1725	2.290	20.8	2.0	18.4
	25.03.82	122.7	115	22.9798	2.269	17.1	2.0	27.5

Таблица 2. Результаты определения величины возмущений, действующих на вращение ИСЗ «Метеор»

Дата	L , кг·м/с	M_3 , мкН·м	M_c , мкН·м	M_a , мкН·м	$\Sigma M_{1,2,3}$, мкН·м	ΔM_{Σ} , мкН·м	M_L , мкН·м	ΔM_{Mag} , мкН·м
07.03.78	736.96	2.53	5.6	32.2	40	—	—	—
24.04.78	539.40	3.64	12.7	32.2	49	—	—	—
27.04.78	513.07	3.32	11.8	38.8	54	5	100	95
11.05.78	573.02	3.17	9.4	31.6	44	—	—	—
12.05.78	465.33	3.19	9.6	27.3	40	-4	90	94
12.07.78	400.25	2.78	7.8	85.4	96	—	—	—
24.07.78	385.46	3.85	16.1	61.4	81	—	—	—
15.08.78	343.41	4.10	21.0	182.3	207	—	—	—
22.08.78	332.34	3.51	13.4	153.7	170	-37	18	55
29.08.78	321.95	3.01	9.2	144.2	156	-14	18	32
20.07.79	165.37	3.82	15.7	42.1	62	—	—	—
15.03.82	544.16	2.15	4.6	104.1	111	—	—	—
16.03.82	533.97	2.15	4.7	166.5	173	62	112	50
26.05.82	542.16	3.54	13.7	128.6	146	—	—	—

ний со стороны земного излучения, а также прямого солнечного излучения.

В табл. 2 для объекта «Метеор» приведены: кинетический момент, возмущающий момент со стороны земного излучения, возмущающий момент со стороны прямого солнечного излучения, аэродинамический момент, а также сумма трех первых моментов, далее их разница между ближайшими наблюдениями, значение момента M_L , изменение магнитного момента, действующего на ИСЗ в интервале между двумя ближайшими наблюдениями.

Воздействие магнитного момента на спутник оценивалось как разница между значением экспериментально установленного момента M_L и действующими на ИСЗ на данном интервале трех первых моментов ΔM_{Σ} . Полученные значения хорошо согласуются с теоретическими выводами относительно величины магнитных возмущений, характерных для высот 850–900 км [2]. Изменение влияния магнитного момента на объект в течение всего интервала наблюдений обусловлено, на наш взгляд, изменением ориентации спутника и вектора его собственного магнитного момента к внешнему магнитному полю Земли.

- Басс В. П. Негравитационные возмущения ИСЗ «Эталон» // Наблюдения искусственных небес. тел.—1990.—№ 86, ч. I.—С. 81—104.
- Белецкий В. В., Яншин А. М. Влияние аэродинамических

сил на вращательное движение искусственных спутников. — К.: Наук думка, 1984.—188 с.

- Епішев В. П., Ісаак І. І., Найбауер І. Ф. и др. Проявлення возмущаючих ефектів в собственном вращении ИСЗ серії «Мідас» и их связь с солнечной активностью // Сб. тез. Междунар. науч. конф. «Околоземная Астрономия — 2003». — М.—Терскол: ИА РАН, 2003.—С. 31.
- Єпішев В. П., Ігнатович С. І., Мотрунич І. І. та ін. Розвиток наукових напрямків лабораторії космічних досліджень УжНУ // Наук. вісн. Ужгородського ун-ту. Сер. Фізика.—2002.—№ 12.—С. 14—26.
- Мишица А. М., Смирнов М. А. Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления // Столкновения в околоземном пространстве (Космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993.—С. 252—271.

A PROCEDURE FOR DETERMINATION OF VALUE AND NATURE OF DISTURBANCES ACTING ON ROTATION OF AES

V. P. Epishev, I. I. Isak, I. I. Motrunich, E. J. Novak

A procedure for the estimation of value and nature of non-gravitational disturbances acting on the rotation of artificial Earth satellites (AES) is described. It is based on high-accuracy determination of own rotation period and orientation of unguided space objects. The procedure is applied to results of observations of AES of the «Midas» (altitude of flight is about 3700 km) and «Meteor» (about 860 km) types. The form of satellites is a combination of a body-cylinder and two solar arrays. In addition, the AES of the «Meteor» type have parabolic-reflector aerial.

© С. П. Кузин, С. К. Татевян

Інститут астрономії РАН, Москва, Росія

МОНИТОРИНГ ДВИЖЕНИЯ ГЕОЦЕНТРА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМ GPS, DORIS И SLR

Приводяться результати регресійного аналізу тижневих рядів руху геоцентра, отримані в Інституті астрономії РАН при обробці вимірювань системи DORIS на інтервалі 1999.2—2002.6 гг. Аналізувались також 10-річні ряди коливань геоцентра, отримані центрами GPS-даних (JPL) і DORIS-даних (IGN/JPL), а також 8-річний ряд лазерних даних Центру космічних досліджень CSR (США). Виявлено річні та піврічні коливання геоцентра, амплітуди яких дорівнювали 1.2—18.5 мм. Виявлено також коротші періодичні складові з амплітудами, зіставними з амплітудами піврічних коливань. Віковий тренд руху геоцентра складає одиниці міліметрів за рік.

Физически геоцентр определяется как центр масс (СМ) земной системы, включая твердую Землю, атмосферу, океаны и гидросферу (ледовый покров Земли, реки, озера, почвенную влагу и т. д.) и относительно него обращаются по орбитам искусственные спутники. Точное знание положения геоцентра очень важно, так как он фиксирует начало земной координатной системы (ITRF), относительно которой решаются все геодинамические задачи, включая определение гравитационного поля, параметров вращения Земли и современных движений земной коры. На практике положение геоцентра закрепляется координатами и скоростями (относящимися к определенной эпохе) глобальной сети станций наблюдений ИСЗ, расположенных на поверхности Земли. Любое перемещение масс в системе Земля вызывает смещения центра масс, которые могут определяться современными методами спутниковой геодезии с миллиметровой точностью с разрешением 1 сут и более. В настоящее время для определения положений и скоростей движения станций на поверхности Земли широко используются космические технологии, такие как лазерные дальномерные измерения (SLR), радиотехнические системы GPS и DORIS, а также радиоинтерферометры с длинной базой (VLBI). Однако следует отметить, что спутниковые технологии, определяющие движение геоцентра, являются весьма чувствительными ко всяким изменениям, связанным с сетью станций слежения (количество, расположение станций).

В последние годы все технологии космической геодезии внесли свой вклад в проблему определения и поддержания земной системы координат и предоставили мировой научной общественности

временные ряды движения геоцентра.

Институт астрономии РАН (ИНАСАН), являясь одним из центров анализа данных международной службы системы DORIS (IDS), послал свои недельные решения осцилляций геоцентра (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/doris/products/geoc/ina> 04wd01.geoc.Z), которые были получены на временном интервале 1999.2—2002.6 с использованием программного пакета GIPSY-OASIS II, разработанного JPL (США). Краткое описание методики определения колебаний геоцентра состоит в следующем.

Ежедневно оценивались координаты всех работоспособных на данный момент станций сети DORIS, полученные с использованием трех спутников, имеющих на борту DORIS приемники (SPOT2, SPOT4, TOPEX). Совместно с координатами станций оценивались орбитальные параметры спутников, параметры вращения Земли, тропосферная рефракция и ряд других величин. Все решения были получены в «слабо определенной сети» (free network approach), для которой характерен априорный разброс координат станций порядка 100 м. Затем суточные решения объединялись в недельные решения, проектировались (уменьшая неопределенность определения системы координат) и трансформировались в «хорошо» определенную (на текущую эпоху) систему координат — ITRF2000. В процессе трансформирования оцениваются семь параметров трансформации, из которых три линейных параметра сдвига начала координат (dx , dy , dz) и масштаб s являются более значимыми, по сравнению с тремя оставшимися параметрами поворота начала системы координат, так как обеспечивают информацию о нулевой точке координатной

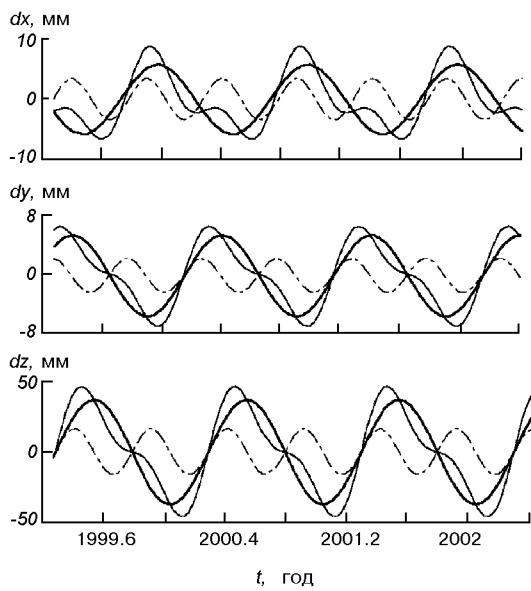


Рис. 1. Вариации геоцентра в системе координат ITRF2000 по данным ИНАСАН DORIS: жирные линии — годовые, штрих-пунктирные — полугодовые, тонкие — годовые + полугодовые

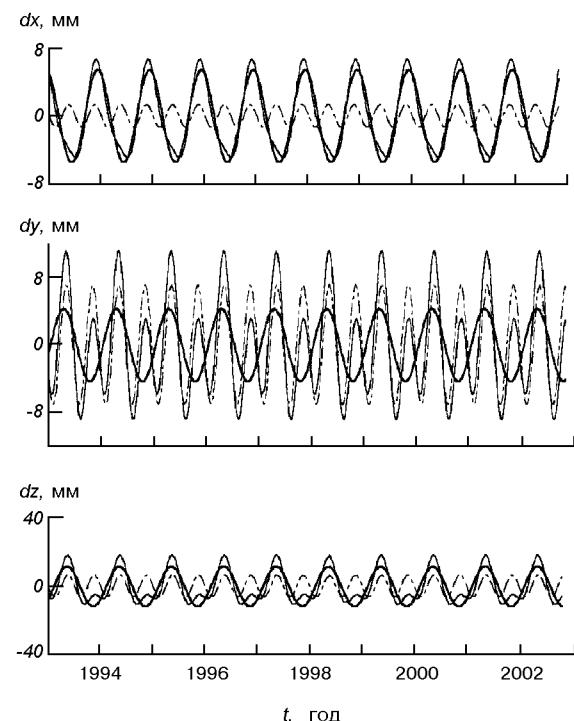


Рис. 2. То же по данным DORIS

системы. Более подробно методика описана в работах [3, 4]. Временные ряды полученного движения геоцентра приведены на рис. 1. Для оценки годовых и полугодовых амплитуд и фаз вариаций геоцентра, которые являются большими по величине по сравнению с другими периодическими составляющими [2], был применен метод регрессионного анализа. Периодические составляющие выделялись из исходного ряда при помощи аппроксимации

$$J(t) = a_0 + b_0 t + A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{P}(t - t_0) + \varphi_0\right),$$

где A_0 — амплитуда сигнала, P — период сигнала, φ_0 — начальная фаза, a_0 — постоянная составляющая, b_0 — тренд, t — текущее время; t_0 — произвольный начальный момент времени отсчета фазы. Постоянная составляющая и тренд оценивались для того, чтобы выразить полученные результаты в общей системе координат. Амплитуды и фазы годовой и полугодовой составляющих приведены в табл. 1 (фазы отсчитываются с начала года).

Полученные значения амплитуд колебаний сравнимы с результатами предыдущего анализа временных рядов колебаний геоцентра [1], в то время как фазы имеют значительные расхождения. Большее по величине значение амплитуды Z -компоненты может быть объяснено преобладающими сезонными перераспределениями земной массы между северным и южным полушариями Земли [5]. Следует отметить, что помимо годовых и полугодовых составляющих колебаний геоцентра, были обнаружены более короткие периодические составляющие (двухнедельные, одно-, двух-, трех-, четырехмесячные) с амплитудами, сравнимыми с полугодовыми сигналами.

Для сопоставления полученных значений движений геоцентра дополнительно с помощью указанной выше методики были проанализированы три временных серии колебаний геоцентра, полученные

Таблица 1. Годовые и полугодовые амплитуды и фазы вариаций геоцентра (система DORIS 1999.2—2002.6)

Компонент	Годовой		Полугодовой		Тренд, мм/год
	А, мм	Фаза, град	А, мм	Фаза, град	
X	5.7 ± 0.8	99.0 ± 11.1	3.4 ± 0.8	157.7 ± 20.9	-3.1 ± 0.9
Y	5.5 ± 0.2	303.9 ± 12.6	2.3 ± 1.1	252.8 ± 14.1	-0.6 ± 0.8
Z	36.4 ± 4.5	254.4 ± 4.0	15.9 ± 1.1	147.9 ± 17.6	6.1 ± 3.4

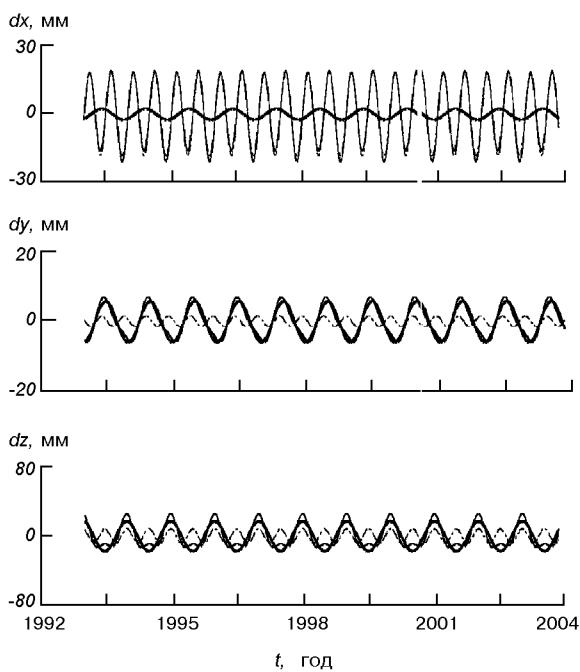


Рис. 3. То же по данным GPS

разными центрами анализа данных и использующие различные спутниковые технологии. Две десятилетних серии суточных GPS (центр анализа JPL) и недельных DORIS (центр анализа IGN/JPL) решений на временном отрезке 1993.0—2003.8 и 8-летняя серия месячных лазерных решений (спутники «Lageos-1» и «Lageos-2») центра космических исследований CSR (США) на интервале 1992.8—2000.2. Данные временные серии доступны для заинтересованных пользователей на сайтах <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mrn>, <ftp://ccdisa.gdfc.nasa.gov/pub/doris/products/geoc> и <http://sbgg.jpl.nasa.gov>. Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2 (фазы отсчитываются с начала года), а графики — на рис. 2—4.

Таблица 2. Годовые и полугодовые амплитуды и фазы вариаций геоцентра (системы GPS и DORIS 1993.0—2003.8, SLR 1992.8—2000.2)

Компонент	Годовой		Полугодовой		Тренд
	А, мм	фаза, град	А, мм	фаза, град	
X	DORIS	5.5±0.3	106.6±5.2	1.3±0.2	160.4±22.0
	GPS	2.4±0.1	304.4±11.0	18.5±0.3	356.4±1.1
	SLR	3.3±0.5	16.3±4.9	1.2±0.5	20±11.2
Y	DORIS	4.2±0.3	339.2±8.4	7.0±0.5	187.5±3.4
	GPS	5.9±0.2	279.4±3.0	1.5±0.2	169.5±11.9
	SLR	5.5±0.5	197.4±2.7	1.2±0.4	6.0 ±16.8
Z	DORIS	11.6±0.1	316.6±19.2	6.6±2.7	178.7±24.4
	GPS	17.3±0.4	107.6±2.8	8.2±0.2	120.7±6.4
	SLR	3.5±0.5	82.9±6.8	2.1±0.6	194.5±9.4

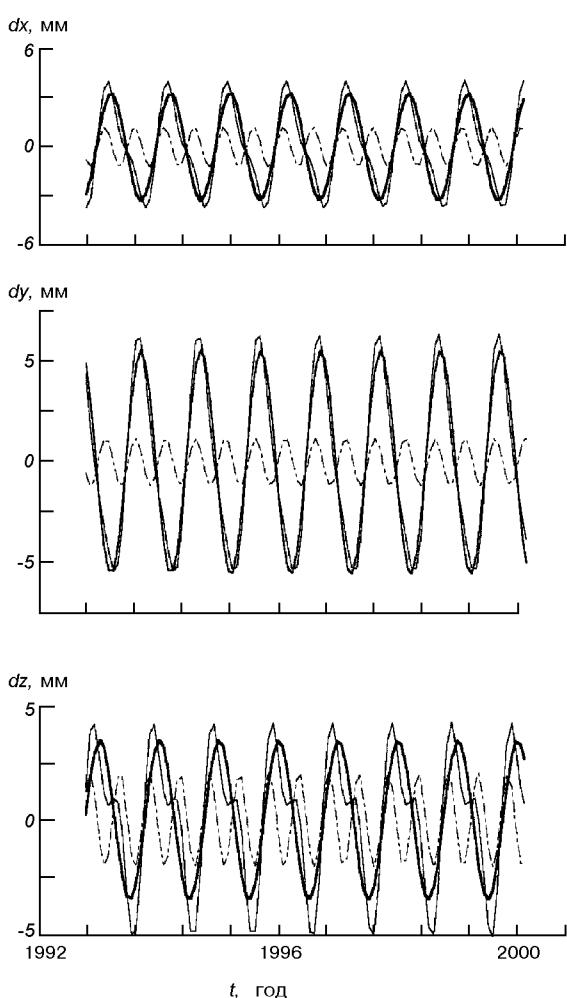


Рис. 3. То же по данным SLR

Из табл. 2 видно, что лазерные данные дают более точные результаты по всем трем компонентам, чем GPS- и DORIS-значения.

Значения амплитуды Z-составляющей для GPS-

и DORIS-технологий в 2-3 раза выше, чем амплитуды X и Y -составляющих.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Варіації руху центра мас Землі можуть бути відповідним чином учені при визначеннях положень станцій слеження в опорній земній системі координат, що особливо важно для алтіметрических вимірювань рівня морського океану, дослідження тектонічного руху материкових плит і для усунення геофізических моделей. Коливання геоцентра, визначені з допомогою технологій GPS, DORIS і SLR, становлять 1.2—18.5 мм по кожній координаті, причому Z -составляюча для GPS- і DORIS-вимірювань в 2-3 рази вища, ніж X і Y . Наши дослідження в області моніторингу руху геоцентра будуть продовжені як в області аналізу часових рядів руху геоцентра більшої тривалості, так і в виявленні вклада різних фізических явищ, що відбуваються в різних компонентах земної системи і впливають на процес руху геоцентра.

1. Boucher C., Sillard P. Synthesis of submitted geocenter time series // IERS Technical Note 25. IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter / Ed. by J. Ray. —

2. Dong D., Dickey J. O., Chao Y., Chehg M. K. Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water // Geophys. Res. Lett.—1997.—24.—P. 1867—1870.
3. Kuzin S. P., Tatevian S. K. DORIS data analysis at the Institute of Astronomy // Proc. of DORIS DAYS, 2-3 may, 2000, Toulouse, France. 2000.
4. Kuzin S. P., Tatevian S. K. On Computation of Weekly Doris Solutions for 1999—2001 Time Period // Proc. of the IDS workshop, Biarritz — France, 13-14 June 2002. http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html
5. Montag H. Geocenter motions derived by different satellite methods // IERS Technical Note 25. IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter / Ed by J. Ray. — Observatoire de Paris, April 1999.—P. 71—74.

MONITORING OF THE GEOCENTRE MOTIONS ON THE BASIS OF DORIS, GPS, AND SLR DATA

S. P. Kuzin, S. K. Tatevian

We give the results of regression analysis of geocentre variations time series which are derived at the Institute of Astronomy of RAS on the basis of DORIS data for a time interval of 1999.2 to 2002.6. In addition, we present the results of analysis of geocentre variations on the basis of DORIS (IGN/JPL analysis centre) and GPS (JPL) data for ten-year period of time as well as on the basis of SLR (CSR) data for eight-year period of time. Annual and semiannual signals with amplitudes from 1.2 to 18.5 mm and some shorter periods are found for all time series. The amplitudes of some short-periodic signals are comparable with the amplitudes of semiannual signals. The secular trend of the geocentre motion with a velocity of a few millimetres per year is found.

УДК 521.9 (085)

© В. П. Єпішев, І. І. Мотрунич, В. У. Клімик

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

РИЗИК ЗІТКНЕННЯ ШТУЧНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ СИНХРОННИХ ОРБІТАХ

Наводиться просторовий розподіл некерованих об'єктів в зоні геосинхронних супутників, розподіл елементів орбіт цих об'єктів, параметрів відносного руху при їхньому зближенні з активними геостаціонарними супутниками. Досліджуються ймовірності зіткнення некерованих об'єктів і ймовірності їхнього зіткнення з активними геостаціонарними супутниками.

Розподіл некерованих супутників на геосинхронних орбітах. Положення некерованих об'єктів на геосинхронних орбітах визначаємо трьома координатами — географічними довготою λ і широтою φ (або δ) підсупутникової точки та геоцентричною відстанню до супутника r . Для отримання розподілу каталогів некерованих геосинхронних об'єктів (НГО) прослідковуємо положення всіх НГО протягом певного проміжку часу Δt (з 1990 по

2004 р.) з кроком 0.01 доби. Послідовно знаходимо просторові координати λ , φ , r всіх об'єктів на моменти часу t , які дають миттєві розподіли НГО. Усереднюючи ці положення по всіх t , одержимо розподіл НГО на проміжку часу Δt . Розрахунки орбіт проводилися на основі аналітичної теорії руху ГО, що враховує несферичність Землі, збурення з боку Сонця та Місяця [1]. Точність обчислення положення ГО на часовому проміжку 15 років

становить 1° .

Розподіл топоцентричного схилення δ для пункту Ужгород будувався за точками $(\delta_i, m_i/(n\Delta\delta))$, де $\Delta\delta$ — довжина інтервалів розбиття ($\Delta\delta = 1^\circ$), δ_i — середина i -го інтервалу, m_i — кількість значень δ , що попадають в i -й інтервал, n — кількість всіх значень δ . Розподіл схилень симетричний відносно середнього значення ($\delta_{\text{sep}} = -6.2^\circ$), але не є нормальним (кривою Гаусса). Функція густини розподілу географічної широти φ НГО мало відрізняється від кривої розподілу значень $\delta + 6.2^\circ$.

Функція густини розподілу геоцентричної відстані r до НГО симетрична відносно середнього значення $\bar{r}_{\text{sep}} = 42164$ км. Від кривої Гаусса вона відрізняється сильним максимумом в точці \bar{r}_{sep} . Переважна більшість НГО розміщені у межах інтервалу $\bar{r} \pm 200$ км. Певний вплив на форму кривої створюють лібраційні супутники, розподіл яких має свої особливості: майже всі ці супутники знаходяться в інтервалі $\bar{r} \pm 30$ км.

Розподіл довготи λ підсупутникової точки НГО близький до рівномірного, але має складну багатопікову структуру. Найбільший максимум знаходитьться біля точки лібрації $\lambda = 75^\circ$, де спостерігається скучення лібраційних супутників типу l_1 .

Просторовий розподіл НГО по r і φ (рис. 1) будувався за даними, одержаними протягом 15 років. Коефіцієнт 736 на рис. 1 переводить φ в області НГО з кутових одиниць (радіан) в лінійні — км. На кривих вказано $m_{\varphi r}$ — кількість положень супутників вздовж всієї зони ГО в області розбиття $\Delta\varphi\Delta r = 5000 \text{ км}^2$. Області розбиття показані на рис. 1 пунктирною координатною сіткою. Значення функції густини розподілу $P(\varphi, r)$ — ймовірності перебування супутника в кільці з площею поперечного перерізу 1 км^2 — можна визначити за формуллою $P(\varphi, r) = m_{\varphi r}/\Delta\varphi\Delta r n$, де $n = 92207$ — вся кількість положень супутників, за якими

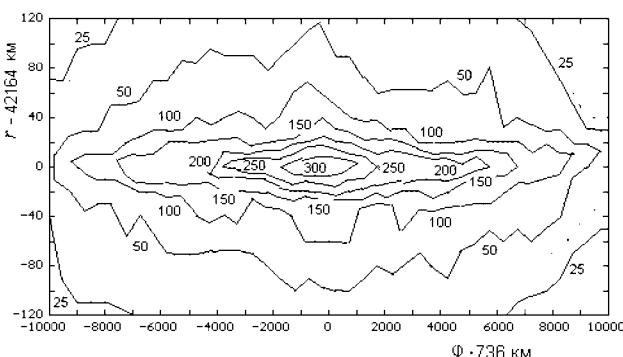


Рис. 1. Просторовий розподіл каталожних НГО за даними r і схилення φ протягом 15 років

160

проводились розрахунки. Функцію $P(\varphi, r)$ досить точно можна представити як неявну функцію рівнянням еліпса:

$$\frac{(736\varphi)^2}{[-29.83P(\varphi, r)k + 10953]^2} + \frac{(r - 42164)^2}{[0.001659P(\varphi, r)^2k^2 - 0.8621P(\varphi, r)k + 121.1]^2} = 1, \quad (1)$$

де $k = \Delta\varphi\Delta r n \approx 46 \cdot 10^7$. Залежність між великою піввісю a еліпса і величиною $P(\varphi, r)$ — лінійна з високим коефіцієнтом кореляції: $\rho = -0.995$. Залежність між малою піввісю b еліпса і $P(\varphi, r)$ складніша. Її ми оцінили параболою в області зміни b від 10 км до 120 км.

Розподілі елементів орбіт НГО. Для побудови кривої густини розподілу нахилу орбіти $P(i)$ (рис. 2) використані орбіти супутників з певним інтервалом на проміжку 15 років (1989—2004 рр.). Чітко виражений «гострий» максимум знаходитьться в точці $i_{\max}' = 11.6^\circ$. Є ще один невеликий максимум в точці $i_{\max}'' = 14.5^\circ$, зумовлений, очевидно, максимальним значенням нахилу орбіти ($i_{\max} = 14.5^\circ$) більшості НГО.

Функція густини розподілу ексцентриситету e стрибкоподібно спадає до нуля. Найбільший максимум функції знаходитьться в точці $e_{\max} = 0.0005$. Ще два максимуми — в точках 0.0015 і 0.0025. Для більшості НГО ексцентриситет не перевищує 0.004.

Максимум функції густини розподілу довготи висхідного вузла $P(\Omega)$ (рис. 3) знаходитьться поблизу точки $\Omega = 60^\circ$. Майже всі значення Ω знаходяться в інтервалі $(-60^\circ; 100^\circ)$. Це зумовлено тим, що на другій половині циклу зміни Ω висхідний і нисхідний вузли міняються місцями, бо площа орбіти супутника перетинає площину екватора.

Функція густини розподілу аргумента перигея ω змінюються дуже стрибкоподібно. Це можна пояснити невизначеністю величини ω при нульовому нахилі орбіти.

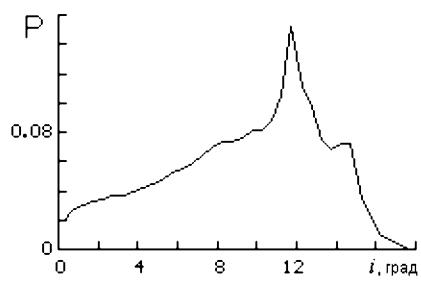


Рис. 2. Розподіл $P(i)$ нахилу орбіти НГО

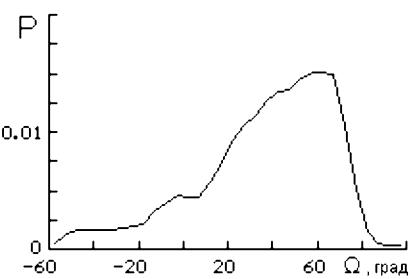
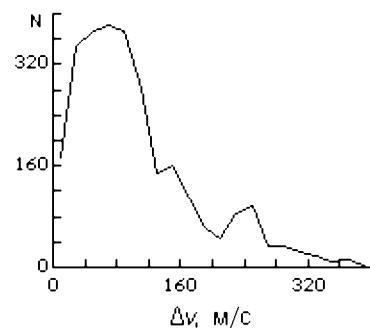
Рис. 3. Розподіл $P(\Omega)$ довготи вихідного вузла НГО

Рис. 4. Розподіл величин відносних швидкостей ГО при небезпечних зближеннях НГО

Розподіл дрейфу НГО також побудовано за даними орбіт на проміжку 15 років. Найбільший максимум знаходитьться в точці $\lambda \approx -2^\circ$ за добу. Наступний за величиною — в точці $\lambda \approx 0^\circ$ за добу. Переважають супутники з від'ємним дрейфом, тобто які рухаються на захід. Це пояснюється виводом активних ГО, які відпрацювали свій ресурс, на зовнішні відносно зони активних ГО орбіти. У більшості ГО дрейф і крива розподілу дрейфу мало змінюються з часом. Цим пояснюється багатопіковий вигляд кривої густини розподілу.

Розподіл параметрів відносного руху супутників при небезпечних зближеннях НГО. В найближчий час орбіти ГО перших запусків почнуть повертатися в площину екватора, що може становити загрозу для активних ГО. Отже, постає проблема дослідження не тільки ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті, але й зміни цього ризику з часом. Використовуємо прямий метод [2]. Обчислюємо положення всіх НГО в певні моменти часу з достатньо малим кроком ($\Delta t = 0.01$ доби) на деякому часовому інтервалі (2 роки). За цими миттєвими розподілами НГО шукаємо небезпечні зближення супутників. Під небезпечним зближенням розуміємо наближення двох НГО один до одного на відстань, що не перевищує 100 км. Параметри зближень розраховуються відповідно програмою і переносяться у спеціальний файл (архів). Цими параметрами є момент мінімального зближення НГО один до одного, відстань між НГО на цей момент, міжнародні номери і типи двох супутників, що зближаються, координати супутників (λ, φ, r) і швидкості їхньої зміни. Відстані між об'єктами у момент зближення можуть використовуватися лише в ймовірнісно-статистичних оцінках, бо похибки визначення орбіт перевищують відстані НГО при небезпечних зближеннях.

Для визначення параметрів відносного руху НГО при небезпечних зближеннях використовуємо ру-

хому прямокутну систему координат, яку называемо місцевою. Початок цієї системи координат O збігається з положенням одного з двох супутників, що зближаються, наприклад, з першим. Вісь x з направлена вздовж геоцентричного радіуса-вектора r першого ГО від центра Землі, вісь y — перпендикулярна до x , на захід, вісь z — перпендикулярна до координатної площини xOz , направлена в сторону північного полюса Землі. Така система координат зв'язана з координатами λ, φ і r наближеними формулами $x = (\lambda - \lambda_1)r$, $y = (\varphi - \varphi_1)r$, $z = r - r_1$, де $\varphi_1, \lambda_1, r_1$ — географічні координати підсупутникової точки і модуль радіуса-вектора першого супутника.

Основним параметром руху при небезпечному зближенні є вектор відносної швидкості $\Delta v = v_2 - v_1$. Будемо розглядати два скалярних параметри: відносну швидкість Δv і кут нахилу між двома прямими, які збігаються з віссю x і з напрямком швидкості Δr . Позначимо цей кут через ψ . Він визначається за формулою $\psi = \arctg [(\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 / \Delta x]^{1/2}$, де $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — координати другого НГО в місцевій системі координат. Очевидно, $0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$.

Розподіли величин відносних швидкостей Δv (рис. 4) і кутів ψ будувались за даними архіву небезпечних зближень за 1990 і 1997 роки. Величини відносних швидкостей при небезпечних зближеннях знаходяться, в основному, в межах від нуля до 300 м/с. Максимум знаходитьться в області 20—100 м/с.

Напрямки НГО, що зближаються, близькі до паралельних: кути ψ між прямими векторів швидкостей двох НГО у переважній більшості за величиною не перевищують 20° . Кути ψ зумовлені значною мірою нахилом орбіти.

Ймовірність зіткнення некерованих ГО. Розподіл $P(r)$ мінімальних відстаней при небезпечних збли-

женнях НГО, знайдений за даними архіву небезпечних зближень за формулою $P(r) = m/(n\Delta r)$, де Δr — інтервал групування, m — кількість небезпечних зближень двох супутників, відстань між якими знаходитьться в даному інтервалі Δr , n — кількість всіх зближень, тобто таких положень двох НГО, мінімальна відстань між якими не перевищує 100 км. Архів містив параметри 5753 зближень (за 2 роки).

За методом найменших квадратів знайшли поліном — наближену функцію густини розподілу відстаней між НГО при небезпечних зближеннях:

$$P(r) = 2.30923 \cdot 10^{-4}r - 4.099228 \cdot 10^{-7}r^2. \quad (2)$$

Середнє значення розмірів НГО за даними каталога 1996 р. становило $r = 8.15$ м. Середнє квадратичне відхилення $\sigma = 8.30$ м. В розрахунках будемо приймати, що середній розмір НГО — 8 м. Ймовірність зіткнення P_s каталогізованих НГО при небезпечному зближенні обчислюється як інтеграл від функції густини в межах від 0 до 8 м:

$$P_s = \int_0^{0.008} P(r)dr = 7.5 \cdot 10^{-9}.$$

Під зіткненням розуміємо зближення двох ГО до відстані між їхніми центрами, не більшої за 8 м.

Ймовірність зіткнення НГО за рік визначалася ймовірністю зіткнення в окремому небезпечному зближенні і кількістю небезпечних зближень протягом року. Ймовірність зіткнення за рік зросла з $2 \cdot 10^{-5}$ в 1990 році до $2.5 \cdot 10^{-5}$ в 1997 році. Таке зростання зумовлене збільшенням кількості НГО.

Участь НГО в зближенні мало залежить від типу супутника. За даними архіву небезпечних зближень найчастіше (з частотою 0.87) зближаються супутники різних типів, і лише 0.13 від всіх випадків — це супутники однакового типу.

Ризик зіткнення некерованих об'єктів з активними ГО. Після закінчення ресурсу активного ГО його виводять із зони активних ГО на геосинхронну орбіту, де він рухається як НГО. Тому ризик зіткнення НГО з активними ГО значно менший, ніж ризик зіткнення двох НГО. Протягом року відбувається близько 90 небезпечних зближень активних ГО з НГО, що складає лише 3 % всіх небезпечних зближень НГО.

Густину розподілу відстані між двома ГО при небезпечних зближеннях НГО з активним, знайдено методом найменших квадратів за точками $P(r) = m/(n\Delta r)$, де інтервал групування $\Delta r = 5$ км, m — кількість небезпечних зближень НГО з активними ГО, відстань між якими знаходитьться в даному інтервалі Δr , n — кількість всіх таких зближень,

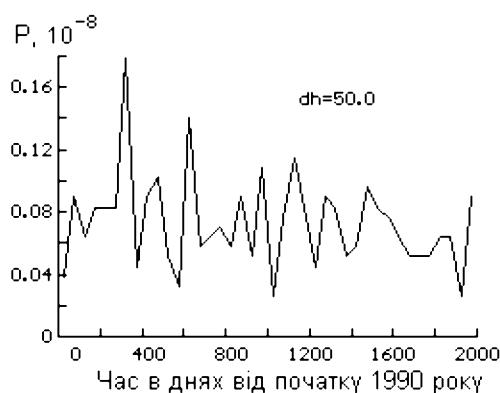


Рис. 5. Зміна ймовірності зіткнення активних ГО з некерованими протягом доби в інтервалі 5.5 років

тобто таких положень двох ГО (НГО і активного), мінімальна відстань між якими не перевищує 100 км. Функція виражається поліномом

$$P'(r) = 1.01003 \cdot 10^{-4}r + 15.858612 \cdot 10^{-7}r^2. \quad (3)$$

Функції густини (2) і (3) відрізняються так, що при небезпечному зближенні ймовірність зіткнення (тобто інтеграл в межах від 0 до 8 м) двох НГО є значно більшою, ніж ймовірність зіткнення активного ГО з НГО. Справді, ймовірність зіткнення активного ГО з некерованим становить

$$P'_s = \int_0^{0.008} P'(r)dr = 3.2 \cdot 10^{-9},$$

що в 2.34 рази менше від ймовірності P_s . Враховуючи також частоту небезпечних зближень НГО і зближень НГО з активними ГО, одержуємо, що ймовірність зіткнення активного ГО на геостаціонарній орбіті в 75 разів менша від ймовірності зіткнення двох НГО. На рис. 5 приведено криву зміни ймовірності зіткнення протягом доби НГО з активним ГО на часовому проміжку біля 5.5 років. Ймовірність обчислювалася як середнє значення на інтервалі 50 діб. Зміна ймовірності відбувається дуже нерівномірно. Найбільший максимум спостерігався на 275-й день. Далі, спадаючи, максимум повторювався ще 3 рази з періодом 330 діб.

Протягом 1990—1995 рр. всього 35 НГО наблизилися до активних на небезпечну відстань. Майже всі ці НГО є дрейфуючими. Найнебезпечнішим із НГО є супутник 78113D (d1), який наблизався до активних ГО 121 раз. Супутник 67066G (d3) наблизався 45 разів, 86007A (d1) та 87109A (d1) — по 27, 75011F (d1) — 25, 77034C (d1) — 23, 70055A (d3) та 79098C (d1) — по 19 разів.

1. Багров А. В., Ерпилев Н. П., Мишиша А. М. и др. Экспериментальная геодинамика: наблюдения геостационарных ИСЗ // Науч. инфор.—1991.—Вып. 69.—С. 35—51.
2. Хуторовский З. Н., Каменский С. Ю., Бойков В. Ф., Смелов В. Л. Риск столкновения космических объектов на низких высотах // Столкновения в космическом пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995.—С. 19—90.

HAZARD OF COLLISIONS OF ARTIFICIAL SPACE OBJECTS IN GEOSYNCHRONOUS ORBITS

V. P. Epishev, I. I. Motrunych, V. U. Klimyk

We present the spatial distribution of unguided objects in the zone of geosynchronous satellites, distribution of orbital elements for these objects, and distribution of parameters of relative motion at their rendezvous with controlled geostationary satellites. The probabilities of collision between unguided objects as well as of their collision with controlled geostationary satellites are studied.

УДК 528.28:629.783

© Н. І. Каблак, В. У. Клімик, І. В. Швалагін, У. І. Каблак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

МОНІТОРИНГ ВИПАДАЮЧОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА ДОПОМОГОЮ GPS ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДИ

Волога зенітна затримка, яка одержується із аналізу даних GPS-спостережень, може бути перетворена у значення випадаючої водяної пари, що дає важомий внесок у моделювання клімату та оперативне передбачення погоди. При цьому повинно бути відоме значення середньої температури в атмосфері. Приведено оцінку значень випадаючої водяної пари в пункті Київ.

Вступ. Для точного прогнозу погоди необхідна інформація виключної якості з високим просторово-часовим розділенням. Через різні обмеження традиційні спостереження у радіодіапазоні або в системі метеорологічних супутників часто не враховують такий важливий параметр, як тропосферна водяна пара. Використання GPS дозволяє застосовувати недорогу технологію для регіонального і глобального моніторингу вмісту водяної пари. Параметр тропосферної затримки $\Delta\varphi$ електромагнітної хвилі є основною величиною при побудові та аналізі метеорологічної моделі для прогнозування погоди. Тропосферна затримка складається з двох компонентів: зенітної гідростатистичної затримки $\Delta\varphi_d$, яка залежить від стану сухої складової атмосфери, і зенітної вологої затримки $\Delta\varphi_w$, яка залежить від вологості повітря.

Похиби врахування тропосферної рефракції в GPS-вимірюваннях впливають перш за все на загальний масштаб геодезичних вимірювань і на точність визначення висоти пунктів спостережень, а також на горизонтальні координати даних пунктів.

Вплив нейтральної атмосфери на GPS-вимірювання. Вплив нейтральної тропосфери на розповсюдження GPS визначається поправкою у відстань [1, 2, 4, 5]:

$$\Delta\varphi = 10^{-6} \int N dS + (L - G), \quad (1)$$

де $N = N(S)$ — індекс рефракції вздовж кривої розповсюдження сигналу, L — шлях розповсюдження сигналу, G — геометрична відстань. Перша складова поправки (1) — це поправка за рахунок зміни швидкості розповсюдження сигналу, друга — геометрична поправка. Індекс рефракції [2, 4] визначається формулою

$$N = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left[K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1},$$

де P_d , мбар — тиск сухого повітря; e , мбар — парціальний тиск водяної пари; T , К — температура повітря; Z_d^{-1} , Z_w^{-1} — фактори стиску сухого і вологого повітря або величини, обернені коефіцієнтам стиску сухого повітря і водяної пари; K_1 , К/мбар — коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря; K_2 , К/мбар — коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води; K_3 , 10^3 К²/мбар — коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води.

Із рівняння Менделеєва — Клапейрона одержуємо

$$N = K_1 R_d \varphi + \left[K_2' \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1}, \quad (2)$$

де

$$K_2' = K_2 - K_1 \left(\frac{R_d}{R_w} \right) = K_2 - K_1 \frac{M_w}{M_d},$$

$R_d = 287.06 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{К}^{-1}$ — питома газова стала сухого повітря, $R_w = 461.525 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{К}^{-1}$ — питома газова стала водяної пари, s — загальна густина повітря, M_d і M_w — молекулярні маси сухого повітря і водяної пари. Перший член в рівнянні (2) — показник заломлення сухого повітря.

Інтеграл в зенітному напрямку дає поправку за рахунок впливу сухої складової атмосфери:

$$\Delta\rho_d^z = 10^{-6} K_1 R_d \int_{r_s}^{r_a} \rho dz,$$

де r_s — геоцентричний радіус антени, r_a — геоцентричний радіус вершини нейтральної атмосфери, dz — одиниця довжини.

Атмосферна поправка у відстань до штучних супутників Землі, спричинена впливом водяної пари, в зеніті становить

$$\Delta\rho_w^z = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{\max}} \left[K_2' \left(\frac{\rho}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1} dh,$$

$$dh = dz.$$

Визначення випадаючої водяної пари за допомогою GPS-спостережень. Вміст водяної пари в атмосferі — це одна з найбільш важливих змінних, що формує клімат Землі. Короткосесонні зміни — це суттєва і необхідна частина інформації для прогнозування погоди. Розподіл водяної пари в атмосфері можна визначити за допомогою радіозондів. Один з головних недоліків радіозондів — це відносно низька точність датчиків в результаті забруднення їх під час запуску.

Використання GPS-систем дозволяє проводити регіональний та глобальний моніторинг випадаючої водяної пари. Використовуючи значення тропосферної затримки, одержані при обробці GPS-спостережень, випадаючу водяну пару (*IWV*) можна визначити за формулою [3]

$$IWV = \Delta\rho_w^z / \xi, \quad (3)$$

де

$$\xi = 10^{-6} R_w \left[K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right].$$

В останній формулі середню температуру T_m можна знайти із формули [3]:

$$T_m = \left(\int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T} Z_w^{-1} dh \right) / \int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} dh.$$

Отже, для переходу від $\Delta\rho_w^z$ до значень випадаю-

чої водяної пари необхідно знати середню температуру атмосфери над даним пунктом. З цією метою потрібно побудувати регресійні залежності середньої температури T_m від температури на поверхні Землі T_0 у пунктах спостереження.

Експериментальні дослідження. На основі даних аерологічного зондування атмосфери (значення T, P, W) в пункті Київ в 2002 та 2003 рр. зроблено порівняльний аналіз значень поправок $\Delta\rho_e$ (стандартні значення), визначених прямим методом за даними аерологічного зондування, значень поправок $\Delta\rho_{GPS}$, знайдених оберненим, незалежним методом (за даними GPS-спостережень), а також значень $\Delta\rho_s$, обчислених по моделі Саастамойнена, з використанням тільки наземних значень метеопараметрів p_0, T_0, W_0 .

На рис. 1 наведено значення атмосферних поправок у віддалі при радіовіддалемірних спостереженнях за даними аерологічного зондування атмосфери в п. Київ протягом 2002-2003 рр. По горизонтальній осі — номер дня, починаючи з 1 січня 2002 р. Добре помітні сезонні зміни значень поправок: влітку вони значно більші, ніж взимку. Середнє значення поправки $\Delta\rho$ на кожний день року вирахується синусоїдою (рис. 1), знайденою за методом найменших квадратів:

$$\Delta\rho = A \sin \left(\frac{2\pi n}{T} + \varphi \right) + \Delta\rho_0, \quad (4)$$

де амплітуда $A = 0.0399$ м, період $T = 356.17$ діб, фаза $\varphi = 227.41^\circ$, вісь синусоїди (середнє значення поправки) $\Delta\rho_0 = 2.3588$ м, n — номер дня від початку 2002 р.; середня квадратична похибка $\sigma = 0.0327$ м.

На рис. 2 наведено розподіл різниць атмосферних

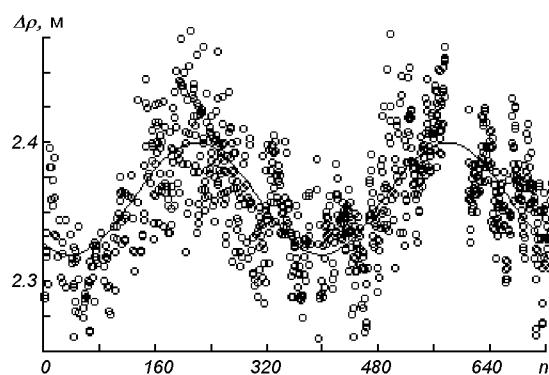


Рис. 1. Сезонні зміни поправок у віддалі при радіовіддалемірних спостереженнях за даними аерологічного зондування атмосфери в пункті Київ протягом 2002—2003 рр.

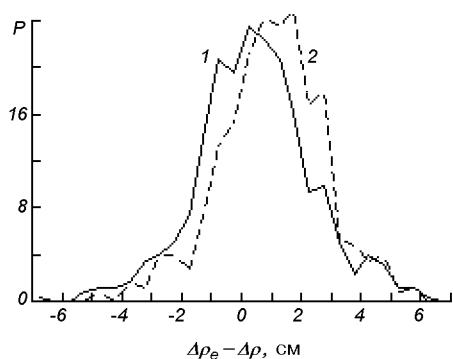


Рис. 2. Розподіл різниць $\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$ (1) і $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$ (2)

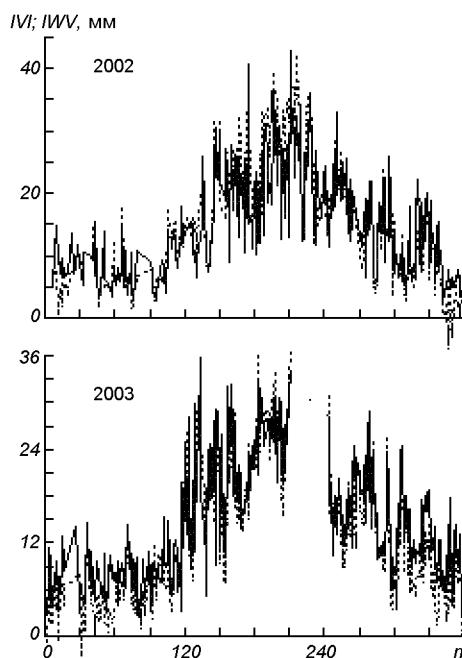


Рис. 3. Річні зміни випадаючої водяної пари, п. Київ, 2002 та 2003 рр.

поправок $\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$ та різниць $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$ за 2002—2003 рр. в п. Київ. По вертикальній осі — частота випадків, віднесена до одиничного інтервалу значень цих різниць d :

$$P = \frac{m}{k \cdot \Delta d},$$

де m — число значень d , що попадає в відповідний інтервал Δd ; k — число всіх значень d , що використовувалися в обчисленнях.

Розходження між $\Delta\rho_e$ і $\Delta\rho_S$ пояснюються тим, що $\Delta\rho_S$ не враховує вертикальний розподіл змін мете-

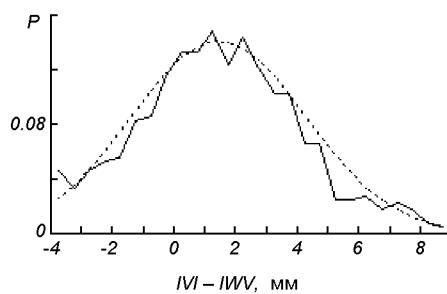


Рис. 4. Розподіл значень $IVI - IWV$ і крива Гаусса

орологічних параметрів. На значення поправки в радіодіапазоні великий вплив також мають інверсії температури, які зумовлюють зростання парціального тиску, що впливає на величину поправки.

Графік розподілу різниць ($\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$) зміщений відносно початку координат. При обробці GPS-спостережень $\Delta\rho_{GPS}$ визначається як невідомий параметр на деякому проміжку часу спостережень, наприклад, на інтервалі 1 год [1].

На основі даних аерологічного зондування атмосфери протягом 2002 і 2003 рр. у пункті Київ обчислені значення випадаючої водяної пари IVI (суцільна крива на рис. 3) за формулою (3). Пунктирна крива на рис. 3 — значення випадаючої водяної пари IWV , знайдені за даними GPS-спостережень.

У пункті Київ за даний період досліджень IWV змінюється в межах від 0 до 35 мм, що співпадає із даними досліджень для регіону Німеччини [3].

За даними спостережень в 2002—2003 рр. в Києві знайдено розподіл різниць $d = IVI - IWV$ (рис. 4, суцільна крива). Інтервали групування різниць $\Delta d = 0.5$ мм. Розподіл близький до кривої Гаусса (пунктирна крива на рис. 4) з параметрами: середнє значення $d_c = 1.45$, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 2.829$. Середнє квадратичне відхилення отриманого розподілу від кривої Гаусса — 0.012.

Беручи до уваги, що точність визначення IWV становить 2 мм, можна стверджувати, що різниці між одержаними значеннями випадаючої водяної пари двома методами практично немає.

Якість прогнозу погоди, тобто визначення випадаючої водяної пари в атмосфері залежить від точності визначення середньої температури. Для пункту Київ запропоновано визначати середню температуру за регресійною залежністю (рис. 5), знайденою за даними аерологічного зондування в Києві в 2002—2003 рр.:

$$T_m = 0.7776200T_0 + 55.5098500,$$

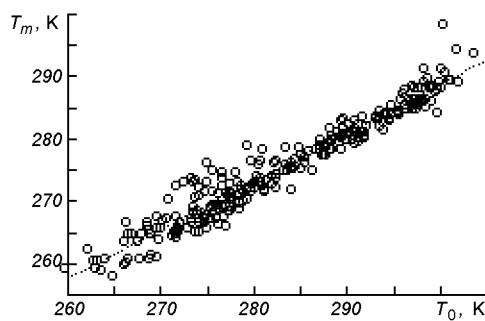


Рис. 5. Залежність середньої температури від поверхневої температури

коєфіцієнт кореляції $\rho = 0.9686$, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 2.12588$.

Висновки. Використання GPS-систем дозволяє проводити регіональний та глобальний моніторинг випадаючої водяної пари — одного з найважливіших параметрів, що формує клімат Землі. Його короткочасні зміни — це суттєва і необхідна частина інформації для прогнозування погоди. Тому дані дослідження слід провадити для всіх пунктів України, де існують перманентні GPS-станції. Недоліком GPS-спостережень є те, що вони не дають

інформації про вертикальний розподіл водяної пари.

Значення випадаючої водяної пари для п. Київ змінюються в межах від 0 до 35 мм.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. — К.: Наук. думка, 1996.—376 с.
2. Каблак Н. І., Клімик В. У. та ін. // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Фізика.—1999.—№ 5.—С. 67—70.
3. Herring T. A., Anthes R. A., Ware R. H. GPS Metrology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the GPS. // J. Geophys. Res.—1992.—97.—P. 15787—15801.
4. Mironov N., Shvalagin I., Kablak N. Earth rotation, reference systems in geodynamics and solar system. — Varschava, 18-19 September 1995.—P. 161—164.
5. Saastamoinen I. I. Contribution to the theory of atmospheric refraction // Bull. geod.—1973.—107.—P. 13—34.

MONITORING OF THE BESIEGED WATER VAPOUR WITH THE HELP OF GPS FOR WEATHER PREDICTION

N. I. Kablak, V. U. Klimyk, I. V. Shvalagin, U. I. Kablak

Estimates of the zenith wet delay which are derived from GPS observational data analysis can be converted into the value of precipitable water vapour. This is important for the climate modelling and weather forecast. For this purpose, the weighted mean temperature of the atmosphere is required. We present some estimates of the precipitable water vapour for GPS observations in Kyiv.

© А. Н. Мащенко¹, А. И. Федякин²

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ
²Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ, Дніпропетровськ

ОПТИМИЗАЦІЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦІОННОГО ЗОНДИРОВАННЯ ЗЕМЛІ ПО КРИТЕРІЮ ЭКОНОМІЧЕСКОЇ ЕФФЕКТИВНОСТІ

Формалізовано задачу обґрунтування параметрів систем космічного апарату в умовах конкуренції продукції на ринку космічних послуг. Параметром, що пов'язує економічні і технічні показники, є надійність. Суміність локальних показників, що характеризують інтегральний коефіцієнт конкурентоздатності, а також його форма визначаються з урахуванням систем пріоритетів Особи, що приймає рішення.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является быстро развивающейся областью, которая уверенно становится вторым (после спутниковой связи) направлением бизнеса, осуществляяемого с помощью космических аппаратов (КА). ДЗЗ является источником данных, которые служат основой для широкого набора информационных продуктов и видов деятельности в странах всего мира.

Для того чтобы КА ДЗЗ Украины оказались рентабельными при совместной эксплуатации с КА других государств, необходимо использовать все возможности, увеличивающие конкурентоспособность национальной продукции ДЗЗ на мировом рынке. Одной из таких возможностей является оптимальный выбор технико-экономических показателей систем КА по критерию прибыли, который позволяет учесть как внешние факторы рынка, (спрос и цену на продукцию *i*-го вида), так и внутренние конструктивные и стоимостные показатели.

Непосредственное решение этой задачи требует знания количественных зависимостей прибыли от параметров систем КА, установление которых — сложная проблема. С целью снижения ее размерности учтем, что величина параметров систем определяется из необходимости обеспечения работоспособности, количественной характеристикой которой является надежность.

Поэтому представляется целесообразным вначале определить оптимальные нормы надежности составляющих подсистем, а затем — соответствующие им параметры.

Рассмотрим возможный вариант декомпозиции решения рассматриваемой задачи.

На первом этапе выбирается масса КА. Для этого

проводится анализ задач отраслей и требований к аппаратуре для их решения [1], формируются альтернативные варианты КА, отличающиеся номенклатурой решаемых задач, комплектующими элементами, массами обеспечивающих и целевых комплексов и др. Для каждого альтернативного варианта определяется математическое ожидание потенциально возможной величины прибыли в предполагаемый период эксплуатации ($0, t$). Для КА, представляющего систему длительного действия [2], состоящей из независимых невосстанавливаемых подсистем, каждая из которых может находиться лишь в двух состояниях (работоспособности и отказа), выражение для математического ожидания прибыли представим в виде

$$\Pi(0, t) = P_0 H_0 \left\{ \Phi_0 + \sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{r_i} \int_0^t \Phi_i(x_i) f(x_i) dx_i + \right. \\ \left. + \sum_{1 \leq i < j \leq h} \frac{1}{r_i r_j} \int_0^t f(x_i) dx_i \int_0^t \Phi_{i,j}(x_i, x_j) f(x_j) dx_j + \dots \right\} - C - C_e, \quad (1)$$

где P_0, H_0 — соответственно вероятности безотказной работы обеспечивающего комплекса и аппаратуры целевого комплекса в интервале $[0, t]$; n_c — количество видов аппаратуры целевого комплекса; Φ_0 — величина дохода КА при условии, что вся аппаратура целевого комплекса была работоспособна в интервале $[0, t]$; r_i — вероятность безотказной работы аппаратуры *i*-го вида; $\Phi_i(x_i)$ — величина дохода КА при условии, что отказала только аппаратура *i*-го вида, причем отказ ее произошел в момент времени x_i ($0 < x_i < t$); $\Phi_{ij}(x_i, x_j)$ —

величина прибыли КА при условии, что отказалася только аппаратура i -го и j -го видов, причем отказы их произошли в моменты времени x_i и x_j соответственно ($0 < x_i < t$, $0 < x_j < t$) и т. д.; $f_i(x_i)$ — плотность времени x_i ; C — себестоимость; C_s — стоимость эксплуатации. В случае, когда каждый вид аппаратуры целевого комплекса вносит независимую долю в общий выходной эффект, выражение (1) приобретает вид

$$\begin{aligned} \Pi(0, t) = \\ = P_0(t) \sum_{i=1}^{n_c} \left[r_i(t) \Phi_i(t) + \int_0^t f_i(x_i) \Phi_i(x_i) dx_i \right] - C - C_s. \end{aligned} \quad (2)$$

Величина дохода зависит от многих факторов (суммарной потребности продукции i -го вида, ее конкурентоспособности, политических, экономических и др. факторов).

Объем продаж коммерческой продукции КА ДЗЗ i -го вида Q_i определяется, прежде всего, ее суммарной потребностью $Q_{\Sigma i}$ (которая определяется по результатам прогнозов на предполагаемый период эксплуатации), числом N_{ki} прогнозируемых КА-конкурентов и ее конкурентоспособностью

$$Q_i = Q_{\Sigma i} \frac{\varphi_{0i}}{N_k},$$

$$\varphi_{0i} + \sum_{j=1}^{N_k} \varphi_j$$

где φ_{0i} и φ_j — коэффициенты конкурентоспособности продукции i -го вида проектируемого КА и КА-конкурентов соответственно.

Полагая, что суммарная потребность Q_{Σ} может быть обеспечена производительностью и временем функционирования аппаратуры, доход от продукции i -го вида будет равен

$$\Phi_i(x_i) = Q_i u_i = \gamma_i x_i u_i \frac{\varphi_{0i}}{N_{ki}}, \quad (3)$$

$$\varphi_{0i} + \sum_{j=1}^{N_k} \varphi_j$$

где γ_i , x_i — производительность и время отказа аппаратуры i -го вида; u_i — средняя за время t цена продукции от решения задачи i -го вида. В качестве исходных данных для расчета прибыли (2) рассматриваются альтернативы применяются данные об аналогах, которые на последующих этапах проектирования будут уточняться.

Оценка коэффициента конкурентоспособности, являющегося интегральным показателем, зависящим от ряда u_i технических, экономических, нормативных, экологических и др. параметров, без

привлечения дополнительной информации (в частности о виде зависимости, «весах» параметров) невозможна [5, 7]. В то же время прогнозирование конкурентоспособности в условиях рыночной экономики — один из важных моментов проектирования, определяющий целесообразность разработки. В связи с этим в [4] подчеркивается, что при решении уникальных многокритериальных задач выбора в качестве источника дополнительной информации необходимо использовать Лицо, принимающее решение (ЛПР), как ответственного за разработку в целом.

Из совокупности известных подходов сравнения альтернатив по многим критериям с использованием информации ЛПР для рассматриваемой задачи наиболее приемлемым является метод на основе теории многокритериальной полезности [5, 7]. Метод основан на аксиоматическом подходе, позволяет реализовать алгоритмы с проверкой на непротиворечивость и транзитивность информации ЛПР, и главное — получать количественные интегральные оценки сравнения альтернатив.

Состав локальных критериев u_i , характеризующих конкурентоспособность продукции аппаратуры целевого комплекса, зависит от требований пользователя о виде продукции (информационные материалы для дальнейшей обработки либо готовые результаты решения хозяйственных задач). В обоих случаях состав локальных критериев определяется на основании информации ЛПР путем построения функций доверия и исследования представительности критериев [7].

В [7] под функцией доверия $\mu(\varepsilon)$ понимается вероятность p истинности утверждения $u(s'') - u(s') = \varepsilon \Rightarrow s'' R s'$ для всех $s'', s' \in S$, где $u(s)$ — критерий, характеризующий соответствие систем $s \in S$ цели; R — бинарное отношение \rangle^A или \langle^A (соответственно более предпочтительно по отношению к цели А либо менее предпочтительно). Обозначив через δ минимальное значение ε , принимаемое во внимание ЛПР в процессе установления предпочтительности между системами на множестве S , в [4] введены определения: при $\lim_{\varepsilon \rightarrow \delta} \mu(\varepsilon) = 1$ критерий $u(s)$ называется представительным; при $0.5 < \lim_{\varepsilon \rightarrow \delta} \mu(\varepsilon) < 1$ — косвенным и при $\lim_{\varepsilon \rightarrow \delta} \mu(\varepsilon) \leq 0.5$ — непредставительным.

В работе [7] отмечается, что только представительный критерий гарантирует истинность (с учетом представлений ЛПР) отношений предпочтительности, установленных по значениям $u(s)$. Но это не означает, что совокупность косвенных, или даже непредставительных критериев не может об-

ладать достаточно высокой представительностью.

Для продукции первого вида в число локальных критериев, обеспечивающих представительность интегрального критерия, могут входить цена и календарное время получения информации, а также [1] оперативность, число спектральных областей электромагнитного излучения в видимом, ИК-, СВЧ- и радиолокационном диапазонах, разрешение на местности в тех же диапазонах. Для продукции второго вида в число локальных критериев могут входить цена, календарное время получения информации, показатели точности решения задачи и др.

В случае, если погрешности критериев ε_i ($i = 1, \dots, n$) независимые величины, функция доверия интегрального критерия будет равна

$$\mu_{1,\dots,n}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = 1 - \prod_{i=1}^n \mu_i(\varepsilon_i),$$

где $\mu_i(\varepsilon_i) = p\{s''Rs' | u(s') - u(s'') = \varepsilon\}$.

Если же локальные критерии — зависимые величины, то

$$\mu_{1,\dots,n}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = 1 - \int_0^{\delta_1} \dots \int_0^{\delta_n} f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \prod_{i=1}^n d\varepsilon_i, \quad (4)$$

где $f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ — многомерная плотность распределения.

В силу того, что локальные функции доверия $\mu_i(\varepsilon_i)$ строятся в соответствии с предпочтениями ЛПР [7], то они, как правило, будут отличны от нормального распределения. В этом случае для определения многомерной плотности $f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ необходимо воспользоваться методикой [3], позволяющей получать многомерные распределения с заданными маргинальными распределениями и зависимостью, определяемой по статистическим данным.

При достижении

$$\begin{aligned} \mu_{1,\dots,n}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) &= p[s'Rs'' | u_1(s') - u_1(s'') = \\ &= \varepsilon_1, \dots, u_n(s') - u_n(s'') = \varepsilon_n] = \\ &= 1 - \int_0^{\delta_1} \dots \int_0^{\delta_n} f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \prod_{i=1}^n d\varepsilon_i \geq \mu_{\text{тр}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mu_{\text{тр}}$ — нижняя граница представительности, интегральный критерий $\mu^{(n)}$ позволяет производить оценку отношений предпочтительности систем с требуемой представительностью [7].

Построение интегрального критерия начинается с проверки условий независимости по приращению и предпочтению [7]. Если выполняется условие независимости по предпочтению, то интегральный критерий имеет аддитивную форму и для его построения целесообразно использовать алгоритм согласо-

ванного шкалирования, процедура которого на примере ракеты-носителя рассмотрена в работе [6]. В более общем случае, когда условия независимости по приращению или предпочтению не выполняются, но установлена справедливость условий существования и непрерывности, интегральный критерий записывается в нормальной форме [7]

$$\varphi(u) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(u^{(i)}), \quad (6)$$

где $u^{(i)} = (u_1, \dots, u_i)$ — вектор, содержащий только первые i из общего числа n критериев.

Для числа локальных критериев $n = 11-12$ определение $\varphi_i(u^{(i)})$ необходимо проводить с использованием алгоритма, основанного на представлении поверхностей безразличия в виде поверхности второго порядка [7]

$$\begin{aligned} \varphi(u) = & \sum_{i=1}^n a_{i,j} u_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n a_{ij} u_i u_j + \\ & + \sum_{i=1}^n (a_{i,n+1} u_i + a_{n+1,n+1}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_{i,j}$ определяются путем решения системы уравнений с учетом информации ЛПР об эквивалентных по предпочтительности точек.

После оценки конкурентоспособности для определения прибыли по выражению (2) необходимо иметь данные по себестоимости создания КА и стоимости его эксплуатации. Этую информацию на рассматриваемом этапе проектирования можно установить на основании статистических данных. Так, например, зависимость себестоимости КА от массы x_1 и отношений ширины обзора к разрешающей способности, умноженного на количество поддиапазонов в видимом, ИК и радиационном диапазонах и на срок существования ($x_2 \dots x_5$ соответственно), определенную по данным о восьми КА ДЗЗ, имеет вид

$$\begin{aligned} c = & -21.7 + 0.046x_1 - 0.0002x_2 + 0.0015x_3 + \\ & + 0.0076x_4 - 0.016x_5. \end{aligned}$$

Квадрат множественного коэффициента корреляции составил 0.96.

Полученные данные позволяют по выражению (2) прогнозировать прибыль рассматриваемых альтернатив и выбрать вариант КА определенной массы.

На следующем этапе проводится традиционное проектирование с учетом полученной на предыдущем этапе информации (массы КА и его целевого комплекса, номенклатуры задач и др.). По результатам эскизного проектирования, когда становятся известными принципиальные схемы работы систем, режимы функционирования, комплектующие эле-

менты и узлы, представляется возможным определение с необходимой при инженерном проектировании точностью зависимостей масса — надежность и стоимость — надежность. Для этого могут использоваться методики оценки надежности [3]. Результаты численных расчетов масс, стоимости и соответствующих им значений надежности вариантов составляющих подсистем аппроксимируются выражениями вида [3]

$$m = a + b \lg(1 - p), \quad (8)$$

$$c = e + d \lg(1 - p), \quad (9)$$

где a , b , e и d — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Предположим, что закон распределения времени до отказов систем КА является экспоненциальным. Тогда с учетом выражений (2), (8), (9) задача оптимального выбора параметров систем КА заключается в том, чтобы найти такие значения показателей интенсивностей отказов систем КА, которые доставляют максимум прибыли (2):

$$\begin{aligned} P(0, t) = \exp \left(-t \sum_{i=1}^{n_{ob}} \lambda_i \right) \sum_{i=1}^{n_{cp}} \left\{ \gamma_i u_i \frac{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q)}{\varphi_{0i}(e^{-x_i t}, Q) + \sum_{j=1}^{N_{ki}} \varphi_j} + \right. \\ \left. + \gamma_i u_i \frac{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q)}{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q) + \sum_{j=1}^{N_{ki}} \varphi_j} e^{-\lambda_i t} \left[-\left(\frac{t}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \right] - \frac{1}{\lambda_i} \right\} - \\ - \sum_{i=1}^{n_{ob} + n_{cp}} [e_i + d_i \lg(1 - e^{-\lambda_i t})] - C_o \rightarrow \max_{\lambda_i} \end{aligned} \quad (10)$$

при ограничении на суммарную массу КА G_{KA} , определенную на предыдущем этапе проектирования:

$$G_{KA} = \sum_{i=1}^{n_{ob} + n_{cp}} [a_i + b_i \lg(1 - e^{-\lambda_i t})]. \quad (11)$$

После определения из системы (10), (11) оптимальных значений интенсивностей отказов систем

λ_i , по выражениям (8), (9) определяются значения масс систем m_i и себестоимостей (с учетом отработки) C_i , по которым находятся оптимальные значения параметров и стоимости отработки систем.

Если полученные оптимальные значения надежностей систем обеспечивающего и целевого комплекса существенно отличаются от принятых (по аналогам) на первом этапе проектирования, то проводится вторая итерация рассмотренного подхода определения оптимальных параметров.

1. Авдуевский В. С., Успенский Г. Р. Космическая индустрия. — М.: Машиностроение, 1998. — 568 с.
2. Беляев Ю. К., Богатырев В. В., Болотин В. В. и др. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.
3. Конюхов С. Н., Федякин А. И. Вероятностно-статистические методы проектирования систем космической техники. — Днепропетровск: Ин-т технической механики НАН Украины и НКА Украины, 1997. — 250 с.
4. Ларичев О. И. Организационные системы и методы стратегического планирования научных исследований и разработок (обзор) // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 5. — С. 133—142.
5. Ларичев О. И., Мошкович Е. М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. — М.: Физматгиз, 1996. — 208 с.
6. Машченко А. Н., Федякин А. И. Методологические аспекты проектирования ракеты-носителя по критерию экономической эффективности // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 2/3. — С. 68—73.
7. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985. — 200 с.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF EARTH-OBSERVATION SPACECRAFT ACCORDING TO CRITERION FOR ECONOMIC EFFICIENCY

A. N. Mashchenko, A. I. Fedyakin

The problem on validation of spacecraft systems parameters under competition conditions on the launch-services market is formalized. The reliability is considered as the parameter linking economic factors with technical ones. A set of local factors evaluating the integrated coefficient of competitiveness as well as its form are defined considering priorities of a decision-making Person.

© В. И. Волошин, А. С. Левенко

Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ УКРАИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЗЗ

Розглядається можливість та необхідність створення системи моніторингу експлуатації вітрових електростанцій в Україні з метою короткочасового прогнозу їхньої роботи. Методика основана на використанні даних дистанційного зондування Землі.

Основой для создания системы экологического мониторинга ветровых электростанций Украины (СЭМ ВЭС) является государственная Комплексная программа строительства ветровых электростанций в Украине [1, 6]. В настоящее время экологический мониторинг ВЭС в Украине не проводится.

Необходимость создания СЭМ ВЭС Украины вызвана реальным развитием ветроэнергетики и выходом ведущих ВЭС, оснащенных ветротурбинами мощностью 56–100 кВт — их установлено более 700, на низкий уровень рентабельного производства электроэнергии. При этом дальнейшее развитие ВЭС планируется вести с использованием более мощных ветротурбин — монтируются ветроагрегаты мощностью 600 кВт, и в ближайшей перспективе планируется изготовление ветроагрегатов мощностью 2.2 МВт. Производство и эксплуатация большого количества мощных ветротурбин приведет к необходимости оценки их влияния на окружающую среду и на систему управления едиными энергетическими сетями (ЕЭС).

В настоящее время в Украине сложилась практика, при которой все промышленные предприятия заведомо являются загрязнителями окружающей среды и обязаны выплачивать штрафы в зависимости от объемов производства продукции.

Такая практика взимания «налога на экологию» в части ВЭС должна быть признана неприемлемой, а оценка влияния ВЭС на окружающую среду должна проводиться не единоразово с использованием данных о какой-то типовой установке, а путем эффективного текущего анализа с учетом технических характеристик конкретного типа ветротурбин и взаимного их расположения; параметров ветра и климата; рельефа местности; наличия и расположения объектов, которые могут подвергаться негативному влиянию со стороны действующих ВЭС и др. [4].

Так как источником энергии ВЭС является ветер, все перечисленные параметры изменяются во

времени, и их определение должно проводиться в процессе мониторинга [7].

Ветровые электростанции имеют особенности:

ВЭС начинает производить промышленную электроэнергию после пуска трех первых агрегатов (для ветротурбин мощностью 56–100 кВт) или даже одного агрегата (при мощности 600 кВт и более) [5];

энергоносителем для ВЭС является не стабильный по характеристикам во времени ветер — в некоторых случаях ветротурбины необходимо выключать для поддержания баланса в единых энергетических сетях, их невозможно запустить при отсутствии ветра и необходимости увеличить приток электроэнергии в сеть;

ВЭС имеют огромное по сравнению с традиционными генерирующими мощностями количество генераторов (и высокую суммарную реактивную мощность), что значительно усложняет их эксплуатацию в единой государственной системе [3].

Эти особенности уже сейчас известны энергетикам, и перспектива управления едиными энергетическими сетями Украины при достижении производства электроэнергии на ВЭС до уровня 10 % от общегосударственного приведет к невозможности эффективного управления имеющимися методами.

СЭМ ВЭС позволяет собирать, обобщать и распространять информацию о технических параметрах работы ВЭС Украины (что особенно важно в процессе многолетнего строительства с постепенным вводом в эксплуатацию генерирующих мощностей), последствиях в части обеспечения экологических норм; осуществлять информационное обеспечение при выборе параметров и зон строительства новых ВЭС с учетом ветропотенциала, путей миграции птиц, населенных пунктов и др.

СЭМ ВЭС должна использовать ГИС-технологии с применением данных ДЗЗ в части перемещений воздушных масс и визуального контроля за количеством введенных в эксплуатацию сотен ветроагрегатов.

Программные средства должны позволять осуществлять моделирование в автоматическом режиме. Они должны создаваться с учетом максимальной простоты и минимальных затрат [2].

Ветроэнергетика получила широкое распространение в мире, и Украина стала единственной страной из бывших республик СНГ, где налажено серийное производство сетевых ветротурбин и осуществляется строительство и промышленная эксплуатация ВЭС по государственной программе.

В настоящее время серийно производятся ветроагрегаты USW 56-107 и T600-48, проводится опытная эксплуатация отдельных образцов отечественных разработок на экспериментальных ВЭС в АР Крым.

К сожалению, экологические последствия строительства и эксплуатации ВЭС в мире изучены недостаточно. Это вызвано и разнообразием ветротурбин, имеющих различные технические параметры, и недостаточной информацией о ветропотенциале, и недостаточным вниманием к самим ВЭС, поскольку их вклад в общее производство электроэнергии очень мал (максимум в Дании — около 10 %, в Украине порядка 0.75 % к 2004 г.).

СЭМ ВЭС Украины предназначена для постоянного сбора сведений и их накопления в базе данных (БД): паспортов ВЭС Украины, данных о состоянии климата и ветропотенциала территории Украины, природных особенностях (путей миграции птиц, заповедных зонах, влиянии высоты и особенностей климата и пр.), электрических сетях Украины и пр. для интерпретации и анализа этих данных с целью оценки экологического влияния ВЭС.

Основой эксплуатации СЭМ ВЭС Украины является наличие топографических, климатических карт с данными о ВЭС, карт ветропотенциала, карт единых энергетических сетей, карт районирования флоры и фауны, карт-схем путей миграции животных и путей перелета птиц, мест зимовий перелетных птиц и зон их временных остановок; текущих данных по эксплуатации ВЭС с учетом изменения приведенных в них данных по результатам ДЗЗ.

Технология должна позволять использовать:

- проведение анализа влияния ВЭС на окружающую природную среду в зависимости от ее местонахождения и параметров, дополнительно — сравнение с традиционными источниками энергии, определение положительного влияния на потенциальное снижение выбросов парниковых газов, в том числе за счет подпитки существующих ЛЭП и снижения энергопотерь в них за счет подключения ВЭС, реальную экономию средств в энергопотенциале страны от внедрения ВЭС, уровень рентабельности и состояние окупаемости вложенных средств, изменение по-

казателей ВЭС за счет изменения климатических показателей и т. д.;

- получение полной информации по ветроэнергетике Украины и ее составляющим, вплоть до интенсивности строительства ВЭС и изготовления ветротурбин;
- макетирование с наложением карт различных параметров;
- выявление потенциальных зон перспективного строительства ВЭС;
- построение цифровой модели текущей эксплуатации ВЭС в едином энергопотенциале Украины в режиме реального времени по данным ВЭС;

Принцип манипулирования и математического моделирования (вплоть до модели эксплуатации отдельно взятой ветротурбины) с использованием топографических карт-основ позволяет решить следующие вопросы:

- накопление и систематизация информации о работе ВЭС в виде унифицированных параметров для оценки экологических норм;
- формирование данных и цифровых снимков ВЭС и территорий для распространения информации об их работе через интернет;
- накопление и анализ данных о ВЭС, экономической эффективности и экологической безопасности;
- оценка степени вероятности ситуаций экологических катастроф.

СЭМ ВЭС Украины позволит на основе опыта исследований сформулировать и продемонстрировать решение научно-технических и практических задач по строительству и эксплуатации ВЭС с уточнением критериев и экологических норм с максимальной эффективностью.

Организация и доступ к данным, хранящимся на внешних носителях и в оперативной памяти компьютера, все обращения к данным, исходящие как от пользовательских программ, так и от других компонентов системы, реализуются через подсистему управления данными. СЭМ ВЭС Украины включает подсистемы:

- оценки состояния экологической опасности в результате эксплуатации ВЭС;
- анализа экологических показателей и норм в процессе эксплуатации ВЭС;
- оценки возможных последствий экологических катастроф в результате негативного воздействия ВЭС.

Данные по эксплуатации каждой ВЭС по итогам работы за год обобщаются и хранятся в памяти сервера БИ СЭМ ВЭС Украины и дублируются на сидеромах.

Эти данные в режиме текущей информации мо-

гут быть использованы для управления ВЭС в составе единых энергетических сетей Украины.

В структурной технологической схеме СЭМ ВЭС Украины должны быть предусмотрены операции ввода и обработки различных видов информации на автоматизированном рабочем месте (АРМ) с возможностью ее отождествления на пространственной основе (картографической и в виде схем), анализа и передачи. АРМ оператора СЭМ ВЭС Украины выполняет функцию ввода и обработки информации, формирования и пополнения БД ВЭС, моделирования процессов, решения прикладных задач и справочного обслуживания пользователя.

С помощью АРМ производится обработка данных, поступающих от ВЭС.

Ядром структуры СЭМ ВЭС Украины является сервер, управляющий информационными ресурсами и режимами работы всей системы. Там же накапливаются и передаются на АРМ информационные материалы. На сервере расположены средства удаленной (телеинформатической) обработки информации: через интернет могут быть подключены удаленные АРМ, расположенные на ВЭС, предприятиях, научных центрах.

Технологическая часть СЭМ ВЭС Украины позволяет работать в ОС «Windows-95», 98. АРМ СЭМ ВЭС Украины включает: РС «Pentium IV-1.8» с объемом памяти 82 Гб и пишущим сидером; устройство ввода информации (сканер); периферийное устройство вывода информации (лазерный принтер, цветной струйный принтер); факс-модем для связи с глобальными информационными сетями;

Сервер СЭМ ВЭС Украины может базироваться на РС «Pentium IV-1.8» с объемом памяти 82 Гб.

Реализация технологии на базе аппаратного комплекса, содержащего персональные компьютеры, позволяет использовать известные оперативные системы и прикладной пакет разрабатываемых специальных программ. Выбранная система программ позволяет вести обмен информацией с национальными и зарубежными информационными системами на стандартных языках программирования.

Пакет прикладного программного обеспечения состоит из:

- ввода и проверки данных;
- хранение данных и управление БД;
- вывод и представление данных;
- взаимодействие с пользователем.

Подсистема преобразования данных включает блок математического моделирования и автоматического анализа; автоматической системы поиска данных.

СЭМ ВЭС Украины имеет следующие стандарт-

ные характеристики:

- ввод информации в растровом и векторном виде;
- работа с магнитными дисками;
- вывод данных в черно-белом и многоцветном вариантах; передача информации в сетевом режиме работы по коммутируемым телефонным каналам связи и интернет;
- формирование математических моделей с представлением картографических данных.

СЭМ ВЭС Украины работает в режиме русского, украинского и английского языков одновременно по выбору пользователя.

Информационная среда СЭМ ВЭС Украины представляет возможности хранения, редактирования, обновления и распространения в единой системе разнообразных данных (таблиц, карт, схем, фотографий, текстов) по ВЭС. Данные о работе ВЭС поступают в систему обработки с привязкой расположения ВЭС к системе координат, что позволяет интегрировать массивы информации различного содержания.

Структурно СЭМ ВЭС Украины состоит из центрального банка данных и массивов информации в удаленных терминалах (АРМ ВЭС).

Научно-методические материалы и пакет программ накапливаются в БД и АРМ, образуя совокупность атрибутивных данных, цифровых карт, схем, таблиц, фотоснимков, которые объединены в следующие БД:

- БД ВЭС Украины;
- БД климатических, природных, энергетических и пр. сведений;
- БД экологических нормативов;
- БД снимков ДЗЗ.

Управление БД и интеграция сведений в соответствии с поступающими запросами осуществляется сервером СЭМ ВЭС Украины, откуда информация через интернет может передаваться пользователям.

В настоящее время система может формироваться за счет:

- экологических, географических, климатических карт, карт ветропотенциала, карт миграции перелетных птиц, карт единых энергетических систем Украины;
- информации по отчетам о работе ВЭС Украины;
- снимков ДЗЗ о ВЭС;
- нормативами по экологии;
- данными по ЕЭС Украины.

Семантическая информация СЭМ ВЭС Украины может быть представлена в виде отдельных файлов, содержащих сведения на цифровых картах, дополненных схемами различного содержания.

Соблюдение принципа технологической открытости

сти СЭМ ВЭС Украины позволяет подключать новые БД и наращивать производительность программно-аппаратного комплекса системы. С целью развития СЭМ ВЭС Украины предусматривается возможность автоматической интерпретации данных и система автоматического поиска данных.

Разрабатываемая система БИ СЭМ ВЭС Украины предназначена для накопления, обработки, хранения и удаленной (телеинформационной) передачи данных о состоянии строительства и эксплуатации ВЭС, расположенных в Украине. На автоматизированном рабочем месте (АРМ) системы формируются БД ВЭС Украины и мира, производится обработка полученных данных.

На сервере располагаются средства удаленной (телеинформационной) обработки информации. К техническому комплексу БИ СЭМ ВЭС Украины через сеть электронной связи подключаются удаленные АРМ ВЭС.

Использование массивов информации позволяет проводить математическое моделирование процессов строительства и эксплуатации ВЭС с целью получения наиболее оптимального варианта с точки зрения эффективного экологического нормирования при использовании альтернативной энергетики в условиях природопользования Украины и эффективного управления в составе ЕЭС.

Ввод в систему данных ВЭС в «текущем времени» позволит моделировать эффективную безопасную работу ВЭС в ЕЭС Украины и использовать данные экологического мониторинга ВЭС в качестве инструментария.

* * *

Основой эксплуатации СЭМ ВЭС Украины являются топографические, климатические карты с данными о ВЭС, карты ветропотенциала, метеоданные на высоте расположения ветротурбин и др., с учетом их текущих изменений по результатам ДЗЗ.

Создание СЭМ ВЭС позволит решить задачу экологического мониторинга ВЭС Украины в режиме текущего времени. Для этого будут использованы данные самих ВЭС (технические: экологические характеристики каждой ветротурбины в зависимости от ее типа, скорости и направления ветра, характеристики ветровых полей и всей ВЭС в зависимости от количества работающих турбин; данные рельефа местности и высоты расположения ветроагрегатов над уровнем моря и т.п.), а также текущие значения ветропотенциала, контролируемые по данным ДЗЗ в части перемещения воздушных потоков. Визуальный контроль ДЗЗ даст информацию о количестве одновременно работающих

ветротурбин. Анализ полученных данных позволит определять экологическую составляющую при работе ВЭС.

Дополнительный результат: ЕЭС Украины для диспетчерского управления получат реальные сведения о количестве работающих ветротурбин, их потенциальной возможности по выработке электроэнергии в зависимости от ветрового потока и состояние ввода генерирующих мощностей на строящихся ВЭС.

Учитывая тенденции бурно развивающейся ветроэнергетической отрасли, создание СЭМ ВЭС Украины может быть отнесено к перспективным направлениям космических исследований в части наблюдения.

1. Бабенко Г. О., Богма В. М., Васько П. Ф., Кукушкін В. І. Вітроенергетичний комплекс України — досягнення, проблеми, перспективи // Новини енергетики.—2003, спец. вип.—С. 1—15.
2. Богатиков О. А., Веселовский А. В., Маханова Т. М., Мещерякова В. Б. Геоинформационная система для оценки опасности катастрофических вулканических процессов // Российский журн. наук о Земле.—2001.—3, № 6.—С. 5—15.
3. Бриль А. О., Васько В. П., Васько П. Ф. Задача компенсації реактивної енергії введених в експлуатацію вітрових електростанцій // Бюл. Міжгалузевого науково-технічного центру віtroенергетики «Віtroенергетика України».—2002.—№ 2.—С. 12—15.
4. ГКД 341.003.003.003.—2000. Віtroенергетика. Площадки для вітрових електрических станцій. Вимоги щодо вибору. — Київ.: Мін-во палива та енергетики України, 2001.
5. Годовой отчет по итогам работы за 2001 г. Государственное предприятие «Донузлавская ветровая электростанция». Министерство топлива и энергетики Украины, АР Крым, Евпатория, 2002.
6. Кукушкін В. І., Богма В. М., Жабський Ю. В. Створення віtroенергетичного напрямку у промисловості України і будівництво віtroелектростанцій як екологічно чистої галузі енергетики // Бюл. Міжгалузевого науково-технічного центру віtroенергетики «Віtroенергетика України».—2002.—№ 1.—С. 5—6.
7. Мартазінова В. Ф. Довгостроковий прогноз віtroенергетичних зон на території України // Бюл. Міжгалузевого науково-технічного центру віtroенергетики Віtroенергетика України.—2001, квітень-травень.—С. 5—6.

SYSTEM OF UKRAINIAN WIND POWER STATIONS ECOLOGICAL MONITORING WITH THE USE OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

V. I. Voloshyn, A. S. Levenko

We consider the possibility and necessity of creation of system of monitoring of wind power stations exploitation in Ukraine with the purpose of short-term forecast of their operation. The method is based on the use of remote sensing data.

© С. Л. Кравцов, Л. В. Орешкина

Об'єднаний інститут проблем інформатики Національної академії наук Білорусі, Мінськ

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ КЛАССОВ ОБЪЕКТОВ

Розроблено методику виявлення і розпізнавання класів об'єктів за їхніми контурами, площі та яскравості на зображеннях дистанційного зондування. Розглянуто особливості виявлення об'єктів залежно від їхнього розміщення на земній і водній поверхнях та виду даних дистанційного зондування.

Методика обнаружения и распознавания классов объектов. Для эффективного обнаружения и распознавания классов объектов на изображениях дистанционного зондирования необходимо, чтобы объекты имели достаточную для определения их класса площадь.

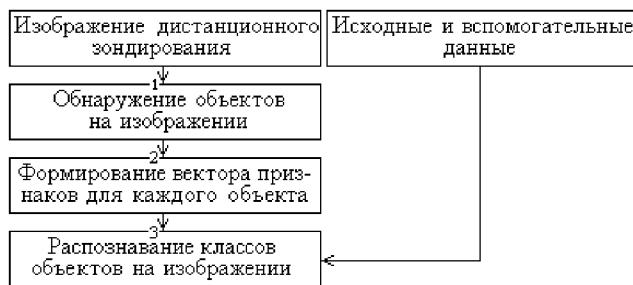


Рис. 1. Методика обнаружения и распознавания классов объектов на изображениях дистанционного зондирования

Исходные и вспомогательные данные выступают в качестве априорной информации для повышения достоверности распознавания классов объектов (рис. 1). На первом этапе производится обнаружение предполагаемых объектов по принципу их полного охвата областью фона либо принадлежности сегменту изображения. Методика обнаружения объектов зависит от вида данных дистанционного зондирования (видимого, радарного диапазонов) и физических представлений о характере местности. На втором этапе для каждого предполагаемого объекта формируется вектор описывающих его свойства признаков. В качестве таковых выступают: класс контура [1], площадь, среднее значение яркости. На третьем этапе путем анализа вектора признаков, исходных данных относительно их характер-

ных значений, а также вспомогательных данных определяется класс каждого из объектов.

Методика обнаружения объектов. Объекты на водной поверхности, изображения дистанционного зондирования видимого диапазона. Для эффективного распознавания классов объектов необходимо, чтобы водная поверхность на изображении занимала не менее 15—20 % всей его площади. На первом этапе (рис. 2, а) по соответствующему водной поверхности участку гистограммы изображения определяются параметры плотности распределения. На втором этапе на изображении дистанционного зондирования методом нуль-гипотезы выделяется водная поверхность [2]. На третьем этапе производится обнаружение предполагаемых объектов исходя из принципа их полного охвата водной поверхностью.

Объекты на водной поверхности, изображения дистанционного зондирования радарного диапазона. Для эффективного распознавания классов объектов необходимо, чтобы земная поверхность на изображении занимала не более 10—15 % всей его площади. На первом этапе (рис. 2, б) определяется пороговый уровень яркости, позволяющий разделить чистую водную поверхность (светлые области) и возможные нефтяные пятна (темные области). На втором этапе на изображении дистанционного зондирования радарного диапазона путем использования пороговой процедуры выделяется водная поверхность. На третьем этапе производится обнаружение нефтяных пятен по принципу их полного охвата водной поверхностью [2].

Объекты на земной поверхности, изображения дистанционного зондирования видимого диапазона. На первом этапе (рис. 2, в) производится сегментация изображения. Вид сегментации и ее параметры устанавливаются предварительно из физических соображений. На втором этапе произво-

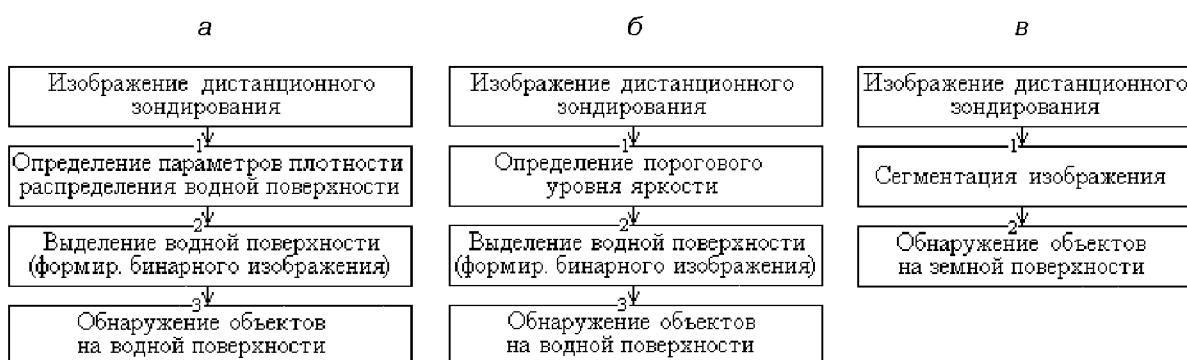


Рис. 2. Методика обнаружения объектов: *а* — на водной поверхности по изображениям видимого диапазона, *б* — на водной поверхности по изображениям радарного диапазона, *в* — на земной поверхности по изображениям видимого диапазона

дится обнаружение объектов по принципу их при- надлежности сегменту изображения.

Результаты эксперимента по обнаружению и распознаванию классов объектов. Объекты на водной поверхности, изображения дистанционного зондирования видимого диапазона. Исходя из размера, формы контура объектов, а также пространственного разрешения данных дистанционного зондирования были определены следующие три класса судов: малого, среднего и большого размеров. В качестве основного признака при распознавании классов объектов использовалась их площадь. После этого значение коэффициента корреляции текущего и эталонного (для данного класса) контуров объектов сравнивалось с минимально допустимым значением.

Были исследованы 17 фрагментов цветных изображений видимого диапазона со спутника QuickBird размером до 1000×1000 пикселей и разрешением 0.61—0.7 м. Вероятность правильного распознавания классов объектов составила 0.66. Такое значение обусловлено невысокой точностью выделения водной поверхности, а также расположением объектов. Точность выделения водной поверхности составила около 80 %, поэтому до 10 % объектов было исключено из процесса распознавания. Основной причиной погрешности ее выделения являются тени от облаков, берегов, мостов и иных сооружений. Неправильно распознанными, а также нераспознанными оказались объекты у причалов и береговой линии, а также близко расположенные друг к другу.

Объекты на водной поверхности, изображения дистанционного зондирования радарного диапазона. Источником происхождения нефтяного пятна линейной формы является движущееся судно, изогнутой — буровая платформа, неоднородной — естественные просачивания в областях существую-

щих и потенциальных месторождений нефти. Хотя со временем и при сильной скорости ветра это соотношение нарушается. В соответствии с этим количество классов нефтяных пятен было принято равным трем: линейный, изогнутый и неоднородный (табл. 1, рис. 3). Класс объектов, удовлетворяющих заданным ограничениям по площади, определялся по максимуму коэффициента корреляции контуров текущего и эталонных объектов [1].

Были исследованы 15 фрагментов изображений с радарных спутников ERS-1, -2, RADARSAT-1 размером до 2000×2000 пикселей и разрешением 20—100 м (рис. 4). Вероятность правильного распознавания классов нефтяных пятен составила около 0.62 (табл. 2). Столь высокое ее значение обусловлено незначительным количеством классов объектов и благоприятными значениями скорости ветра. Погрешность же определения классов нефтяных пятен была обусловлена неточностью выделения водной поверхности, расположением объектов, а также изменением формы нефтяных пятен со време-

Таблица 1. Характеристика эталонных классов объектов

Параметры	Класс объектов		
	линейный (а)	изогнутый (б)	неодно- родный (в)
Коэффициент корреляции	а	1	0.81
	б	0.81	1
	в	0.73	0.75
Площадь, пик.	мин.		100
	макс.		60 000

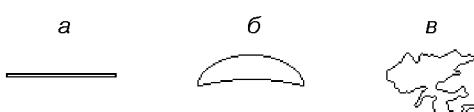


Рис. 3. Эталонный контур объекта



Рис. 4. Последовательность обработки радарного изображения при распознавании классов объектов: а — исходное изображение, б — обнаружение нефтяных пятен, в — выделение контуров нефтяных пятен



Рис. 5. Примеры контуров правильно распознанных классов нефтяных пятен: а — линейного нефтяного пятна от перемещающегося судна; б — изогнутого нефтяного пятна от буровой платформы; в — неоднородного нефтяного пятна от естественного просачивания

менем [3, 4]. Примеры контуров правильно распознанных классов нефтяных пятен показаны на рис. 5.

Объекты на земной поверхности, изображения дистанционного зондирования видимого диапазона. Количество классов объектов было принято равным трем: «здание», «транспортное средство», «резервуар». При распознавании объекты, удовлетворяющие заданным условиям по площади, на основании анализа коэффициента корреляции относились к одной из двух групп: «здание», «транспортное средство» — «резервуар». При отнесении объекта к последней группе процесс распознавания его класса заканчивался. В противном случае разделение между классами «здание» и «транспортное средство» производилось по площади объекта.

Были исследованы четыре фрагмента изображений со спутника QuickBird размером до 2000×2000 пикселов и разрешением 0.61—0.7 м. Вероятность правильного распознавания классов объектов составила около 0.12. Столь низкое ее значение обусловлено особенностями процедуры сегментации изображения, а также расположением объектов. Так, объединение в результате сегментации близких тематических категорий приводило к потере объектов.

Заключение. Разработана методика распознавания классов объектов, расположенных на земной и

Таблица 2. Результаты распознавания классов нефтяных пятен на водной поверхности по изображениям дистанционного зондирования радарного диапазона

Характеристики	Класс нефтяного пятна			Итого
	линейный	изогнутый	неоднородный	
Количество	30	97	29	156
Результатирующая вероятность распознавания	0.3	0.67	0.76	0.62

водной поверхности, по изображениям дистанционного зондирования видимого и радарного диапазонов. Для эффективного распознавания классов объектов необходимо, чтобы они имели достаточную площадь, а также выполнялись ограничения относительно наличия и площади иных классов поверхности земли. В качестве недостатка можно назвать зависимость методики обнаружения объектов на изображениях дистанционного зондирования от их вида (радарного или видимого диапазона) и класса объектов. Результаты эксперимента показали работоспособность разработанных методик. При распознавании классов объектов учитывались их размер, форма контура и яркость. Вероятность распознавания классов объектов составила от 0.06 до 0.66. Столь невысокое ее значение обусловлено недостаточно высокой разрешающей способностью данных дистанционного зондирования, условиями их получения, невысокой точностью обнаружения объектов (из-за неоптимальности использованных процедур), их расположением, а также несовершенством методики распознавания классов объектов.

1. Кравцов С. Л. Распознавание классов объектов по их контурному представлению // Цифровая обработка изображений: Сб. науч. тр. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001.—Вып. 5.—С. 170—177.

2. Кравцов С. Л., Мухо И. Н. Распознавание классов объектов, расположенных в однородной области изображения // Анализ цифровых изображений: Сб. науч. тр. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2002.—Вып. 1.—С. 79—84.
3. Кравцов С. Л., Орешкина Л. В. Обнаружение и распознавание классов объектов на изображениях дистанционного зондирования // Первый белорусский космический конгресс. 28—30 октября 2003 г. Материалы конгресса. Объединенный ин-т проблем информатики НАН Беларуси. — Минск, 2003.—С. 140—142.
4. Кравцов С. Л., Орешкина Л. В. Распознавание классов объектов на изображениях дистанционного зондирования // Анализ цифровых изображений: Сб. науч. тр. — Минск: Объединенный ин-т проблем информатики НАН Беларуси, 2003.—Вып. 2.—С. 84—96.

PROCESSING OF REMOTE SENSING DATA FOR DETECTION AND RECOGNITION OF OBJECT CLASSES

S. L. Kravtsov, L. V. Oreshkina

We developed a procedure for detection and recognition of object classes on the basis of contours, squares and brightness of objects on remote sensing images. We consider some features of detection of objects in relation to their location on terrestrial and water surfaces and to a kind of remote sensing data.

УДК 528.8

© В. И. Волошин¹, В. М. Корчинский², А. А. Негода³

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет

³Національне космічне агентство України, Київ

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПАНХРОМНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Пропонується методика підвищення інформативності панхромних цифрових знімків ДЗЗ шляхом вейвлетної декомпозиції з використанням мультиспектральних знімків території нижчого розрізнення та подальшого синтезу результатів декомпозиції.

Одним из путей повышения информативности панхромных цифровых изображений, полученных с космических аппаратов (КА), с позиций их интерпретации и дешифрирования является включение в них информационных компонентов соответственных многоспектральных изображений, полученных в различных спектральных диапазонах электромагнитного излучения — носителя видеинформации. В работе предложена методика повышения радиометрического разрешения панхромных цифровых снимков, основанная на вейвлет-технологии обработки двумерных цифровых сигналов.

В качестве количественной меры информативности принята сигнальная энтропия, определенная выражением

$$E = - \sum_{i=0}^{N-1} p_i \log_2 p_i,$$

где

$$p_i = - n_i / \sum_{i=0}^{N-1} n_i;$$

n_i — количество пикселов с уровнем яркости i ,

суммирование производится по всему множеству уровней яркости, определяемому ее динамическим диапазоном $0, 1, \dots, N - 1$. Полная информативность изображения размерностью $M \times L$ пикселов составляет $I = MLE$.

Сигнальная энтропия связана с вероятностью распознавания соотношением [1, 4]

$$P_{\text{pac}} = \exp \left[-k_{\Sigma} \frac{d \sqrt{m}}{L \sqrt{E} S} \right], \quad (1)$$

где d — линейное разрешение при абсолютном контрасте, k_{Σ} — коэффициент распознавания формы объекта, L — линейный размер объекта; M — медиана кодов яркости (МКЯ), S — средний квадратичный разброс кодов яркости по полю снимка (СКОЯ), m — среднее значения кодов яркости.

Как известно, вейвлет-декомпозиция двумерного цифрового сигнала заключается в его иерархическом представлении в виде суммы аппроксимирующей и набора детализирующих составляющих, обладающих различными пространственными масштабами [1, 3]. Вейвлет-разложение распределения

яркости цифрового изображения после N этапов декомпозиции определяется выражением

$$f(\mathbf{r}) = f_N^{(a)}(\mathbf{r}) + \sum_{k=1}^N [f_k^{(h)}(\mathbf{r}) + f_k^{(v)}(\mathbf{r}) + f_k^{(d)}(\mathbf{r})], \quad (2)$$

где $f_k^{(a)}(\mathbf{r})$ — функция распределения яркости аппроксимирующей составляющей на k -м уровне декомпозиции, $f_k^{(h)}(\mathbf{r})$, $f_k^{(v)}(\mathbf{r})$, $f_k^{(d)}(\mathbf{r})$ — функции распределения яркости детализирующих компонент на k -м уровне декомпозиции соответственно в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях цифрового изображения.

Координатное описание распределений яркости в соответствии с общими принципами вейвлет-преобразований можно представить в виде

— для аппроксимирующего компонента

$$f_N^{(a)}(\mathbf{r}) + \sum_{\alpha} A_{N,\alpha}^{(a)} \Phi_{N,\alpha}(\mathbf{r}),$$

— для детализирующих компонентов

$$\begin{aligned} f_k^{(h)}(\mathbf{r}) &= \sum_{\alpha} h_{\alpha}^{(k)} \Psi_{k,\alpha}^{(h)}(\mathbf{r}), & f_k^{(v)}(\mathbf{r}) &= \sum_{\alpha} v_{\alpha}^{(k)} \Psi_{k,\alpha}^{(v)}(\mathbf{r}), \\ f_k^{(d)}(\mathbf{r}) &= \sum_{\alpha} d_{\alpha}^{(k)} \Psi_{k,\alpha}^{(d)}(\mathbf{r}), \end{aligned}$$

где $\Phi_{N,\alpha}(\mathbf{r})$, $\Psi_{N,\alpha}^{(h)}(\mathbf{r})$, $\Psi_{N,\alpha}^{(v)}(\mathbf{r})$, $\Psi_{N,\alpha}^{(d)}(\mathbf{r})$ — координатные функции вейвлет-базиса соответственно для аппроксимирующего и детализирующих компонентов на N -м уровне декомпозиции, $A_{N,\alpha}^{(a)}$, $h_{\alpha}^{(k)}$, $v_{\alpha}^{(k)}$, $d_{\alpha}^{(k)}$ — соответствующие коэффициенты разложения, $\alpha = (n, m)$ — мультииндекс, указывающий суммирование по всему полю цифрового изображения.

Предлагаемая методика повышения радиометрического разрешения панхромных цифровых снимков включает следующие шаги.

1. Уравнивание разрядности первичных панхромного и многоспектрального изображений.

2. Установление уровня N вейвлет-декомпозиции.

3. Вейвлет-декомпозиция на уровне N первичного панхромного снимка — выделение детализирующих компонентов в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях с наборами коэффициентов $H_{\text{пан}}^{(k)}$, $V_{\text{пан}}^{(k)}$, $D_{\text{пан}}^{(k)}$, где $k = 1, \dots, N$.

4. Вейвлет-декомпозиция на уровне N изображений спектральных каналов первичного многоспектрального снимка — выделение детализирующих компонентов в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях с наборами коэффициентов $H_n^{(k)}$, $V_n^{(k)}$, $D_n^{(k)}$, где $k = 1, \dots, N$, (n — номер спектрального канала).

5. Определение наиболее информативных изображений детализирующих компонентов спектральных каналов в горизонтальном, вертикальном и диаго-

нальном направлениях с наборами коэффициентов $H_{\text{опт}}^{(k)}$, $V_{\text{опт}}^{(k)}$, $D_{\text{опт}}^{(k)}$.

6. Формирование линейных форм вейвлет-коэффициентов детализирующих компонентов в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях: $H_{\text{синг}}^{(k)} = aH_{\text{пан}}^{(k)} + bH_{\text{опт}}^{(k)}$, $V_{\text{синг}}^{(k)} = aV_{\text{пан}}^{(k)} + bV_{\text{опт}}^{(k)}$, $D_{\text{синг}}^{(k)} = aD_{\text{пан}}^{(k)} + bD_{\text{опт}}^{(k)}$.

7. Вейвлет-реконструкция — формирование синтезированного цифрового изображения на основе аппроксимирующего компонента первичного панхромного изображения, полученного на уровне декомпозиции N , и детализирующих компонентов с коэффициентами $H_{\text{синг}}^{(k)}$, $V_{\text{синг}}^{(k)}$, $D_{\text{синг}}^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$ на основе выражения (2).

Уровень вейвлет-декомпозиции N , коэффициенты линейных форм a , b и порядок вейвлет-фильтра определяются по критерию максимизации сигнальной энтропии синтезированного изображения, и тем самым — вероятности распознавания: $P_{\text{pac}}(N, a, b) \rightarrow \max$.

Ниже представлены результаты применения предлагаемой методики. На рис. 1 приведено первичное панхромное изображение размерностью 400×400 пикселей, полученное с КА «Ikonos» (линейное разрешение 1 м), на рис. 2 — соответствующее многоспектральное изображение такой же размерности (линейное разрешение 4 м), на рис. 3 — результирующее изображение, рис. 4 иллюстрирует зависимость сигнальной энтропии изображений спектральных каналов многоспектрального снимка от уровня декомпозиции, из которого следует, что оптимальным является ее девятый уровень.

Значения сигнальных информативностей пространственных компонент изображений спектральных каналов на оптимальном уровне декомпозиции приведены в табл. 1, в соответствии с данными которой для формирования детализирующих компонентов синтезируемого изображения были выбраны: для горизонтального и диагонального направлений — синий спектральный канал, для вертикального направления — красный спектральный канал.

При построении результирующего изображения, синтезированного по изложенной методике (рис. 3) использовался вейвлет-базис Добеши четвертого порядка, который, как показали проведенные исследования, обеспечивает наибольшую сигнальную энтропию синтезированного изображения. Сравнительные показатели информативности первичного панхромного и синтезированного цифровых изображений приведены в табл. 2, данные которой свидетельствуют о существенном увеличении информативности синтезированного изображения в сравнении с первичным панхромным изображением, что

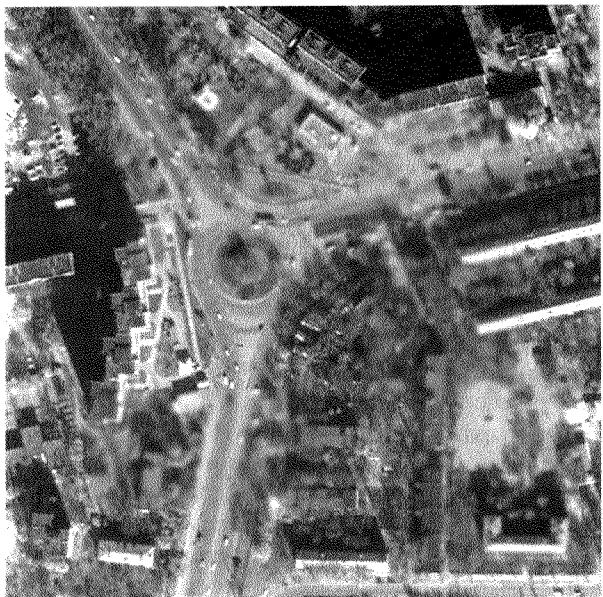


Рис. 1. Первичный панхроматический снимок



Рис. 2. Первичный многоспектральный снимок



Рис. 3. Синтезированное изображение

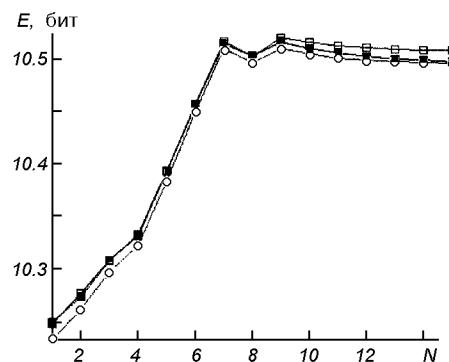


Рис. 4. Зависимость сигнальной энтропии изображений спектральных каналов многоспектрального снимка от уровня декомпозиции

Таблица 1. Информативности пространственных составляющих спектральных каналов после вейвлет-декомпозиции

Пространственная составная	I, кбит		
	Красный канал	Зеленый канал	Синий канал
Горизонтальная	1233.8	931.6	17332
Вертикальная	1031.2	1.238	375.07
Диагональная	1705.1	1735.6	27616

подтверждается также на уровне визуального восприятия.

Расчеты вероятностей распознавания по синтезированному изображению в соответствии с выраже-

Таблица 2. Показатели информативности первичного панхроматного и синтезированного цифровых изображений

Изображение	Сигнальная энтропия, бит	Динамический диапазон	СКОЯ	МКЯ
Первичное панхроматное	39.71	232	55.28	103.5
Синтезированное	47.54	256	72.38	102.0

нием (1) показывают ее возрастание на 2-4 %, причем этот эффект наиболее выражен применительно к малоразмерным объектам.

1. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физ. наук.—2001.—171, № 5.—С. 465—501.
2. Травникова Н. П. Эффективность визуального восприятия. — М.: Машиностроение, 1985.—128 с.
3. Чуи К. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. — М.: Мир, 2001.—414 с.
4. Ye J. C., Bresler Y., Moulin P. Fourier Descriptors for Parametric Shape Estimation in Inverse Scattering Problems // Proc. of SPIE.—2000.—4052, N 4.—Р. 309—320.

ENHANCEMENT OF INFORMATIVENESS OF PANCHROMATIC SPACE DIGITAL IMAGES

V. I. Voloshyn, V. M. Korchinski, O. O. Negoda

We offer a procedure for the enhancement of information density of panchromatic space image by means of wavelet decomposition of the image and multispectral images with lower resolution for the surveyed territory with following synthesis of decomposition results.

© Е. И. Капустин¹, А. И. Кириллов¹, Е. И. Махонин², К. Ф. Волох²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ,
²Національне космічне агентство України, Київ

СОЗДАНИЕ СТРУКТУРЫ АРХИВА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НАЦИОНАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА УКРАИНЫ

Розглядається створення архіву даних дистанційного зондування Землі в рамках Національного космічного агентства України, процедура надходження інформації в архів та отримання її користувачами.

Одиночные космические системы ДЗЗ обычно не решают всех задач, связанных с наблюдением тех или иных объектов (районов поверхности Земли), и, как правило, являются частью систем мониторинга. Многие процессы, происходящие на Земле, протекают медленно — десятилетия и более. Среди

них эрозия почв, образование оврагов, состояние лесов, движение пустынь, изменение русел рек, границ морей. Для изучения этих процессов, оценки их природы и состояния необходима информация о состоянии Земли за много лет, в связи с чем приобретает актуальность задача накопления ре-

зультатов космической съемки в архивах для обмена с другими системами. Для этой цели и создаются архивы данных ДЗЗ, которые будут аккумулировать информацию, принимаемую от национальных и зарубежных спутников.

Специальной комиссией Национального космического агентства Украины проведен анализ имеющихся архивов хранения данных ДЗЗ на соответствие закону Украины «Про архівні установи» и условий обеспечения долгосрочного (более 10 лет) хранения данных ДЗЗ на машинных носителях информации. Обследование показало, что в Украине нет архивов, обеспечивающих необходимые условия хранения, и они не оформлены юридически. Таким образом, встал вопрос о необходимости создания архива данных ДЗЗ НКАУ. Комиссия определила и возможное месторасположение архива.

Выбор места расположения архива данных в Центре приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля (ЦПОСИ и КНП) определен:

- наличием приемных станций в диапазонах 137 МГц, 1.7 ГГц, 2.2 ГГц, 8.2 ГГц;
- наличием программно-технического комплекса (ПТК-Д) обработки аэрокосмических изображений, позволяющего обрабатывать получаемые от КА изображения до уровня требований по международной классификации.

В ЦПОСИ и КНП начат регулярный прием данных от КА «Тегра», «Метеор-3М», NOAA (4 аппарата), «Meteosat», готовы к приему данных от КА «Січ-1М» и «Микроспутник», в перспективе — МС-2-8. Создается универсальная приемная станция 8.2 ГГц, после ввода которой в эксплуатацию можно будет принимать данные с зарубежных КА («Spot», «Landsat», IRS и другие). После начала приема данных с космических аппаратов «Січ-1М» и «Микроспутник» объем принимаемой в сутки информации достигнет 15 Гбайт, а с 2006—2007 года после запуска «Січ-2» и «Січ-3» — 30—35 Гбайт. При таких объемах поступающей информации необходим очень четкий порядок приема и хранения информации в архиве, а также должен быть обеспечен быстрый поиск необходимой информации по заявкам потребителей.

Для выбора основных принципов построения архива данных ДЗЗ НКАУ были обследованы также архивы данных ДЗЗ, созданные в ФГУП ЦКН, НПО «Планета» и Центре оперативного мониторинга Земли (Россия), их построение, использование носителей для долговременного хранения, спектр предоставляемых услуг. Часть архивов была проанализирована по интернету: Инженерно-технологический центр СканЭкс, www.scanex.ru; Ар-

хив данных ДЗЗ Байкальского центра МПР России (Байкальский региональный информационно-космический центр), www.geolirk.ru; Южный региональный информационно-аналитический центр (г. Ростов-на-Дону), www.dzz.ru; Центр ДЗЗ Югорского НИИ информационных технологий, www.uriit.ru;

По зарубежным архивам — архив «Sirius» космической системы «Spot», архив EDS DAAC космической системы «Landsat», архив «Space Image» космической системы «Ikonos».

По обследованным архивам данных можно выделить общие для всех принципы построения:

- наличие электронного каталога данных ДЗЗ, к которому обеспечен доступ потребителей по интернету;
- по запросу потребителю выдаются «сжатые» изображения с краткой аннотацией для определения своей заинтересованности в данной информации;
- выходная продукция архивов, как правило, предлагается потребителям на оптических дисках. При необходимости срочной доставки продукции, отдельные архивы предлагают услугу предоставления данных ДЗЗ по интернету;
- обеспечена возможность войти в контакт по интернету для заказа на приобретение интересующих его данных ДЗЗ;
- обеспечено предоставление на WEB-сайте архива различной справочной информации по космическим аппаратам, приборам ДЗЗ, методам обработки информации и т. п.

По результатам обследования архивов и выбранного места расположения разработан эскизный проект, в котором рассмотрены: состояние архивации данных ДЗЗ в отечественных и зарубежных космических системах, характеристика области и условий применения архива ДЗЗ; функции «Архива данных ДЗЗ» и его основные технические параметры; структура, состав и проектные решения по видам обеспечения функционирования; проектные решения по размещению, средствам хранения информации, реализации специальных требований; вопросы надежности функционирования и организации работ; технико-экономические показатели создания «Архива данных ДЗЗ» и его эксплуатации; этапность работ по созданию, необходимые организационно-методические документы и мероприятия по вводу «Архива данных ДЗЗ» в эксплуатацию.

В результате проведенного анализа архивов данных ДЗЗ при создании архива НКАУ в ЦПОСИ и КНП приняты к реализации следующие положения:

- электронный каталог архива должен обеспечивать поиск информации по схеме «КА — прибор — координаты района»;
- потребителю данных ДЗЗ должны выводиться все имеющиеся в электронном каталоге «сжатые» изображения с краткой аннотацией в соответствии с запросом потребителя;
- в отдельных операциях обработки данных ДЗЗ, при их помещении в оперативный архив и для выполнения обработки данных ДЗЗ при реализации заявок потребителей, необходимо использование программно-технического комплекса обработки аэрокосмических изображений (ПТК-Д);
- WWW-сервер архива должен содержать нормативно-справочную и рекламную информацию различного назначения (данные об архиве, сведения о предоставляемых услугах архива, характеристики КА ДЗЗ и приборов полезной нагрузки).

В технологическом цикле функционирования созданного архива данных ДЗЗ можно выделить основные технологически законченные процедуры:

- размещение данных ДЗЗ в оперативном архиве, обработка и удаление;
- формирование пакетов данных ДЗЗ, запись их на носители данных и сдача на хранение в долговременный архив;
- цикл работы с заявками потребителей на получение информации о наличии данных ДЗЗ в архиве и предоставлении данных ДЗЗ;
- поддержание целостности и сохранности БД архива данных ДЗЗ;
- хранение носителей данных в долговременном архиве.

Поиск необходимых данных в оперативном архиве осуществляется с помощью «генератора» запросов по вектору параметров поиска (ВП)

$$ВП = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)^T$$

при выполнении условий

$$\begin{aligned} & ЧР_{tp} \subset K_i, \\ & НГ_3 \leq ПН \leq ВГ_3, \\ & О_\phi \leq О_3, \end{aligned}$$

где a_1 — тип и номер КА, a_2 — бортовой прибор, a_3 — координаты заявленного района, a_4 — нижняя временная граница поиска, a_5 — верхняя временная граница поиска, a_6 — допустимый уровень облачности, $ЧР_{tp}$ — часть требуемого района, K_i — выбранные кадры, $НГ_3$ и $ВГ_3$ — нижняя и верхняя временные границы поиска, $ПН$ — время съемки

i -го кадра, $О_\phi$ и $О_3$ — фактическая и заданная пользователем облачность.

В процессе функционирования архив данных ДЗЗ информационно взаимодействует со структурными элементами ЦПОСИ и КНП и внешними абонентами.

Со структурными элементами ЦПОСИ и КНП архив данных ДЗЗ взаимодействует по двум основным направлениям:

- получение нормализованных данных ДЗЗ (уровень обработки 1В) для размещения их в архиве;
- проведение операций по обработке данных ДЗЗ, помещаемых в архив, либо проведения дополнительной обработки данных ДЗЗ по заявке потребителя.

Данные ДЗЗ, помещаемые в архив (нормализованные изображения полученные от научной аппаратуры КА — по международной классификации уровень 1В) поступают от следующих структурных единиц ЦПОСИ и КНП:

- ПТК «Архивация изображений» от КА «Сич-1М» и «Микроспутник»;
- ПТК «Обработка аэрокосмической информации» (ПТК-Д) от КА «Метеор-3М», НООА, КА «Тегга»;

В части проведения операций по обработке данных ДЗЗ, помещаемых в архив, либо проведения дополнительных уровней обработки данных ДЗЗ по заявкам потребителей, архив данных ДЗЗ взаимодействует с комплексом обработки аэрокосмической информации (ПТК-Д), имеющим в своем составе специальные программные средства обработки изображений.

Внешними абонентами, информационно взаимодействующими с архивом данных ДЗЗ, являются: системы мониторинга (например ИАС НКАУ); потребители данных ДЗЗ (государственные структуры); потребители данных ДЗЗ, заинтересовавшиеся в получении архивной информации на коммерческой основе.

Взаимодействие с потребителями данных ДЗЗ осуществляется на этапах приема заявок и выдачи данных ДЗЗ на носителях данных. Заявки на получение данных ДЗЗ могут носить долговременный и разовый характер и поступают в архив различными способами: почта; телефон; электронная почта; WWW-сервер архива.

К перспективным задачам структурного развития архива данных ДЗЗ НКАУ можно отнести создание единого каталога данных ДЗЗ Украины, независимо от владельца информации.

Создание в Украине КА нового поколения (микроспутник «Сич-2») будет давать изображения с

разрешением 7.8 м) позволит накапливать в архиве данные ДЗЗ, привлекательные для зарубежных потребителей, особенно если учесть открытость и доступность подобной информации в Украине. Интеграция «Архива данных ДЗЗ» в европейский каталог расширит возможности украинских пользователей.

REMOTELY SENSED DATA ARCHIVE OF NATIONAL SPACE AGENCY OF UKRAINE: CREATION OF STRUCTURE AND WAYS OF INTEGRATION

Ye. I. Kapustin, O. I. Kirillov, Ye. I. Makhonin, K. F. Volokh

We consider the creation of remotely sensed data archive within the framework of the National Space Agency of Ukraine, the procedure of arrival of information at the archive and the procedure of reception of information by users.

УДК 528.8

© В. И. Волошин¹, Е. И. Бушуев¹, В. Т. Марченко¹, О. П. Федоров²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Пропонуються принципи створення національної системи геоінформаційного космічного забезпечення, яка доповнює відомчі системи моніторингу і забезпечує науковий підхід до вивчення природного середовища як єдиного цілого.

Развитие космических информационных технологий (наблюдение Земли и околоземного космического пространства, навигация, связь) и геоинформационных систем создало все необходимые предпосылки для построения качественно новой системы геоинформационного обеспечения государства.

Действующая в Украине система информационного обеспечения построена по ведомственному принципу. Каждое ведомство несет ответственность за контроль и исследование определенных природных и техногенных сфер и ресурсов, имеет собственную сеть наблюдений, методики и средства сбора и анализа информации. Информация собирается по ведомственным вертикалям, отдельные источники данных слабо увязаны между собой, что не дает возможности проводить комплексный и оперативный анализ состояния регионов.

Этот недостаток можно устраниТЬ путем интеграции ведомственных систем по территориальному признаку, что обеспечит научно обоснованный подход к изучению и контролю природной среды как единого целого.

При реализации такого подхода неизмеримо возрастает роль космических информационных технологий:

а) наблюдения Земли с авиакосмических платформ — источник оперативной, многодисциплинарной и объективной (инструментальной) информа-

ции. Особенности ДЗЗ позволяют рассматривать эти данные как основу для верификации и интеграции сведений от различных ведомственных источников.

б) GPS-съемки — источник оперативной и высокоточной привязки объектов наблюдения к единой системе координат. Это мощный интегрирующий и верифицирующий фактор при создании многоцелевых территориальных информационно-аналитических систем национального, регионального и муниципального уровней.

Однако для данных ДЗЗ характерны и существенные ограничения, затрудняющие их применение в производственных информационных технологиях:

— опосредованный характер измерений параметров подстилающей поверхности в виде электромагнитных образов, что влечет за собой необходимость дополнительной трудоемкой обработки с использованием специальных методик, вспомогательных наземных данных и др.;

— отсутствие аттестованных методик обработки данных ДЗЗ, обеспечивающих гарантированное качество конечного информационного продукта;

— отсутствие нормативной базы, регламентирующей обязательное (или рекомендуемое) использование данных ДЗЗ при решении различных производственных тематических задач;

- низкая оснащенность пользователей аппаратно-программными средствами обработки данных ДЗЗ;
- в целом по стране низкий уровень профессиональной подготовки пользователей в части обработки и использования данных ДЗЗ;
- нерегулярный и нестабильный характер поступающих к пользователям данных ДЗЗ, затрудненный доступ к оперативным и архивным данным;
- высокие начальные затраты отдельных пользователей при самостоятельном освоении и внедрении технологий ДЗЗ (закупка данных ДЗЗ и средств их обработки, подготовка операторов ДЗЗ, создание и отработка технологий решения тематических задач на производственном уровне и др.).

В целом указанные ограничения в существенной степени снижают интерес пользователей к этому виду информации и объективно являются тормозом в становлении ДЗЗ как производственной информационной технологии.

Решению всех выше перечисленных проблем должна способствовать создаваемая система геоинформационного космического обеспечения (СГИКО), направленная на обеспечение эффективного использования данных ДЗЗ в основных областях человеческой деятельности, включая хозяйственную и управляемую деятельность национального и регионального уровней, а также научные исследования Земли и мониторинг окружающей среды в рамках международных и национальных программ.

Задачи и функции СГИКО следующие.

1. Формирование и развитие рынка пользователей аэрокосмической информации:

- создание, отработка и аттестация методик решения тематических задач (с участием пользователей);
- оснащение пользователей специализированными аппаратно-программными средствами для обработки аэрокосмической информации (на договорной основе);
- подготовка и обучение пользователей;
- реализация совместных прикладных программ, проектов и экспериментов на договорной основе;
- реализация маркетинговой и рекламной деятельности.

2. Реализация долговременной научно-технической политики НКАУ в области наиболее эффективного использования данных и средств ДЗЗ:

- анализ потребностей государства и общества в данных ДЗЗ и путей реализации этих потребностей;
- формирование межведомственных и региональных программ использования данных ДЗЗ;

— участие в формировании и реализации международных программ и проектов по использованию данных ДЗЗ;

— управление реализацией целевых программ использования данных ДЗЗ;

— формирование нормативной базы, регламентирующей требования к источникам данных ДЗЗ, процессам обработки и использования этих данных;

— формирование требований к продукции и услугам перспективных космических систем ДЗЗ;

— создание новых методов и методик решения тематических задач, обеспечивающих расширение рынка данных ДЗЗ.

3. Своевременное и регулярное снабжение субъектов государственного управления и мониторинга аэрокосмической информацией, в том числе:

— результатами первичной тематической обработки данных ДЗЗ до определенного уровня (космокарты, ортокосмокарты, специальные тематические карты типа вегетационного индекса, радиационной температуры поверхности и др.);

— результатами тематической обработки аэрокосмической информации с использованием наземной заверочной информации (тематические карты, ГИС-проекты и др.) по заявкам пользователей.

4. Интеграция СГИКО в европейскую (GMES) и мировую (GEOSS) системы использования ДЗЗ путем:

— интеграции космических средств и программ наблюдения Земли;

— формирования и реализации совместных программ использования данных ДЗЗ;

— гармонизации стандартов и нормативных документов в производстве и использовании данных ДЗЗ.

В рамках первой, второй и третьей космических программ Национальным космическим агентством создана необходимая техническая, информационная и методическая база для создания СГИКО. В первую очередь необходимо отметить создание и развитие КС «Січ» в составе космического и наземного сегмента — основной и независимый источник данных ДЗЗ для СГИКО. В настоящее время ведется техническое проектирование универсальной станции приема, что позволит принимать данные от ряда зарубежных КА.

Источником данных по высокоточной координатной привязке являются сигналы от глобальных навигационных систем NAVSTAR и ГЛОНАСС. НКАУ в настоящее время реализует проект «Навігація», обеспечивающий внедрение в Украине дифференциальной подсистемы GPS для высокоточного позиционирования объектов, создание соответствующих средств и технологий для оснащения пользователей.

В рамках проектов созданы и создаются отдельные подсистемы и программно-технические комплексы, которые могут рассматриваться как элементы СГИКО или как функционально-взаимодействующие системы:

- программно-технический комплекс ПТК-Д обработки изображений — разработан и в 2003 г. передан в опытную эксплуатацию в ЦПОСИ и КНП (г. Дунаевцы);
- подсистема оперативного космического мониторинга (разработан эскизный проект, ведется техническое проектирование);
- система архивации данных ДЗЗ — разработан эскизный проект;
- главный информационный зал (ГИЗ) — разработана документация.

В рамках проектов «Зондування», «Методика» разработан обширный набор методических материалов по тематической обработке данных ДЗЗ.

Таким образом, в настоящее время представляется возможным развернуть работы по созданию СГИКО как постоянно действующей системы.

При выборе структуры СГИКО необходимо учитывать следующие ситуационные факторы и установки внутреннего и внешнего характера.

1. СГИКО создается как производственная постоянно действующая система, рассчитанная на обслуживание разнообразных и географически распределенных абонентов (ведомственных и региональных ИАС, международных проектов и программ). В свою очередь, эти абоненты являются не только пользователями данных и услуг СГИКО, но и заказчиками и партнерами в освоении и внедрении новых технологий ДЗЗ.

2. Приоритетным абонентом СГИКО является НКАУ как субъект государственного управления космической деятельностью, в том числе и направлением ДЗЗ. В этом аспекте СГИКО выступает в роли «обобщенного пользователя» данных ДЗЗ и в этом качестве система должна выполнять важную для НКАУ функцию обратной связи «пользователь данных ДЗЗ — разработчик КС наблюдения Земли». Реализация этой функции в общем случае должна предусматривать выполнение следующих частных и взаимосвязанных между собою функций-заданий:

- мониторинг региональных, национальных и международных потребностей (проблем), связанных с исследованиями и контролем окружающей среды и ресурсов, контролем и прогнозом чрезвычайных ситуаций, обеспечением экологической, экономической и военной безопасности, обеспечением управления развитием территорий в пределах административных единиц управления;

— обобщение и структуризация потребностей в зависимости от возможности их удовлетворения средствами ДЗЗ;

— формирование программ удовлетворения потребностей в данных ДЗЗ;

— управление программами удовлетворения потребностей.

3. КС «Січ» является главным и независимым источником данных ДЗЗ для СГИКО. В то же время для обеспечения необходимой регулярности данных в общем случае необходимо привлечение данных от зарубежных космических систем наблюдения Земли.

4. Инфраструктурный характер СГИКО определяет в качестве приоритетного задания создание благоприятной информационной среды для интеграции СГИКО с информационно-аналитическими системами (ИАС) разного уровня и разных направлений.

5. Международные инициативы и программы по созданию систем геоинформационного космического обеспечения европейского GMES (Global Monitoring for Environment and Security) и мирового GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) уровней определяют необходимость гармонизации структуры, функций и правил функционирования СГИКО с соответствующими системами GMES и GEOSS.

6. Источниками информации для СГИКО являются данные, получаемые от космической системы «Січ» и зарубежных КА; данные ДЗЗ, получаемые через международные сети распространения данных ДЗЗ; данные от собственных наземных и авиационных средств ДЗЗ; данные от навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и NAVSTAR; данные наземных наблюдений и обследований, получаемых от ведомственных и региональных информационно-аналитических систем.

Исходя из перечисленных выше ситуационных факторов и установок внутреннего и внешнего характера, потенциала отрасли в этой области деятельности, в СГИКО предлагается включить штатные элементы в составе, определяющем СГИКО по своим функциональным признакам как систему поддержки пользователей (СПП). Учитывая потенциал по работам с пользователями, предлагается выполнение функций указанных подсистем возложить на организации НКАУ и организации, имеющие необходимый опыт и оборудование: ИКИ, ЦАКИЗ, ГП «Днепрокосмос», ЦРЗЗ, МГИ, ГНПЦ «Природа», НЦУИКС. В целом эти организации выполняют функции распределенного центра СГИКО. Основным инструментом взаимодействия с пользователями являются целевые программы ис-



Структурная схема СГИКО

пользования данных ДЗЗ.

В составе информационных систем НКАУ источниками данных для СГИКО являются:

а) система оперативного кризисного мониторинга (СОКМ) как составная часть информационно-аналитической системы ИАС НКАУ. СОКМ разрабатывается в составе ИАС по отдельному ТЗ, и эта разработка ведется в опережающие сроки по отношению к СГИКО.

В обеспечение функций СГИКО на СОКМ предполагается возложить выполнение следующих основных задач:

— оперативное и регулярное обеспечение абонен-

тов СГИКО и центров системы поддержки пользователей результатами первичной тематической обработки данных ДЗЗ по согласованному перечню параметров;

— предоставление каналов связи ИАС НКАУ центрам системы поддержки пользователей

— использование аппаратно-программных средств и персонала СОКМ для отработки методик решения тематических пользователей на этапе опытной эксплуатации методик;

б) космическая система «Січ» как основной и независимый источник данных ДЗЗ.

СГИКО в целом как украинская система использования данных ДЗЗ является лишь одним, хотя и приоритетным потребителем продукции КС «Січ». Для экономически эффективной эксплуатации КС подавляющая часть продукции должна поставляться на международный рынок. В этом плане характеристики КС должны учитывать потребности и конъюнктуру международного рынка, а сама разработка и эксплуатация КС носит относительно самостоятельный от СГИКО характер.

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND FUNCTIONING OF GEOINFORMATIONAL SPACE SUPPORT SYSTEM

V. I. Voloshyn, Ye. I. Bushuyev,
V. T. Marchenko, O. P. Fedorov

Principles of the creation of national geoinformational space support system (UkrGMES) are offered. UkrGMES supplements existing departmental systems of monitoring and ensures scientifically proved approach to study and control of environment as a whole.

УДК 528.8

© В. И. Волошин¹, Е. И. Бушуев¹, О. И. Паршина¹,
А. Ю. Панкратов², А. М. Глущенко³

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Інформаційне агентство «АПК-Інформ», Дніпропетровськ

³Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Дунаївці

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПЛОЩАДИ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Визначено площину озимих за космічними знімками та оцінку стану посівів. Методику призначено для запровадження у практику агрометеорологічного забезпечення.

Специалисты ГП «Днепрокосмос», НЦУИКС, АПК «Информ» провели мониторинг сельскохозяйствен-

ных угодий Снигиревского района Николаевской области (Украина) с использованием данных, полу-

ученых КА «Метеор-3М» 01.04.2004 г.

Использованы дополнительно цифровые карты региона масштаба 1:500000 и топографические карты региона масштаба 1:100000.

Для первоначальных данных были выполнены контрастирование и выравнивание гистограммы изображения; привязка и мозаика изображений; создание и применение маски населенных пунктов к выбранным для дальнейшего анализа данным; фрагментирование данных исследуемой территории; расчет вегетационного индекса; создание векторного слоя, расчет площадей; создание тематической карты выбранного района.

По результатам анализа облачности и качества изображений, полученных по территории Украины от КА «Метеор-3М» за период с конца марта по начало апреля 2004 г. для дальнейшего анализа была определена территория Снигиревского района Николаевской области. Этот район полностью вошел в зону покрытия спутниковым изображением (рис. 1).

В основу изучения растительности дистанционными методами положен принцип распознавания образов на основании спектральных отражательных характеристик растений. По разным данным точность такого распознавания 70—80 %. Традиционными стали исследования растительности с помощью так называемых карт вегетационного индекса NDVI (Normalised Difference Vegetation Index). Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от других факторов) участках спектральной кривой. В красной области спектра (0.6—0.7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ИК-области (0.7—1.0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Высокая фотосинтетическая активность, связанная, как правило, с густой растительностью, ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему — в инфракрасной. Соотношение этих показателей позволяет анализировать растительные объекты и четко отличать их от других объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражения увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние помех, обусловленных облачностью, дымкой в атмосфере.

Индекс NDVI вычисляется по формуле

$$NDVI = R_{\text{БИК}} - R_{\text{красный}} / R_{\text{БИК}} + R_{\text{красный}},$$

где $R_{\text{БИК}}$ — отражение в ближней ИК-области спектра (0.75—1.0 мкм); $R_{\text{красный}}$ — отражение в красной области спектра (0.55—0.75 мкм). NDVI может быть рассчитан на основе снимков любого

пространственного разрешения.

На рис. 2 приведено изображение, полученное в результате расчета NDVI по территории Снигиревского района Николаевской области; поля озимых культур выделены ярким тоном. Рассчитанная общая площадь всходов озимых составила 27746 га. По данным районного сельхозуправления эта площадь составляет 27713 га, т. е. погрешность составила 0.12 %.

Для определения площади отдельных полей были выбраны в отдельности расположенные поля правильной геометрической формы (прямоугольник). На рис. 3 слева приведен фрагмент измерения площади вручную, справа — результат вычисления площади поля по векторному слою, полученному после классификации. Результаты определения площади поля хозяйства «Рассвет» практически совпадают: 100.420 га — результат измерения по космоснимку, 98.8432 га — результат вычисления площади после векторизации, 100 га — данные хозяйства.

ВЫВОДЫ

1. Спутниковые данные КА «Метеор-3М» позволяют проводить работы по оценке площадей озимых зерновых культур на ранней стадии вегетации; при этом расхождение со статистическими данными может составлять около 1-2 %.

2. Для вычисления индекса NDVI не нужно никаких дополнительных данных и методик, кроме непосредственно самой космической съемки. Для повышения точности оценки необходимо использовать механизм маскирования и буферных зон, например вдоль рек или вокруг населенных пунктов. Использование масок сельскохозяйственных угодий обеспечило бы наибольшую точность результата определения площади, занимаемой озимыми зерновыми культурами.

3. Условием корректного определения площади отдельных полей являются высокое качество всходов (густота и плотность), четкая форма полей, их разделенность между собой, высокое разрешение спутниковых данных.

4. Расчет NDVI целесообразно проводить на основе серии разновременных снимков с заданным разрешением для получения динамической картины процессов изменения границ и характеристик разных типов растительности. Благодаря всем этим особенностям карты NDVI являются промежуточной дополнительной основой для проведения более сложных типов анализа.

5. Для проведения анализа всходов озимых необ-

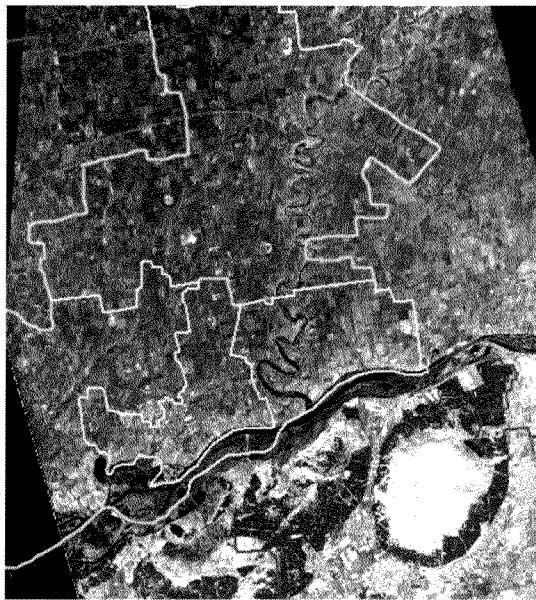


Рис. 1. Фрагмент изображения от 01.04.2004 г.

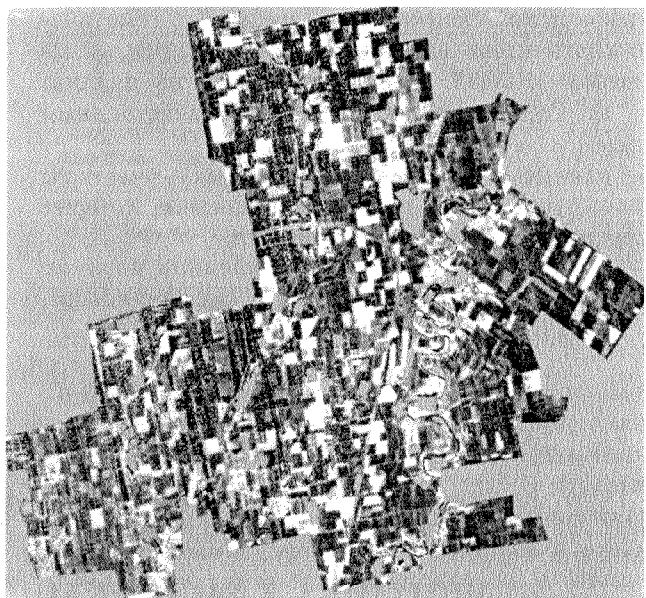


Рис. 2. Результат расчета NDVI (светлый тон — озимые)

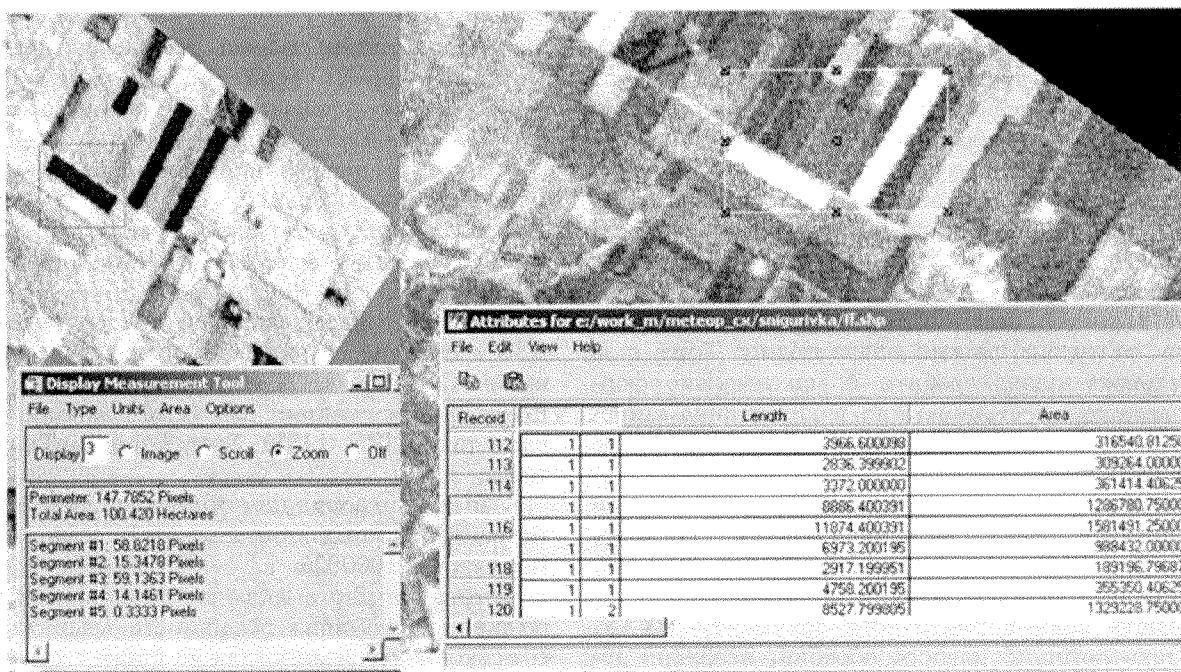


Рис. 3. Определение площади поля хозяйства «Рассвет»

ходимо иметь: — топографические карты районов исследования масштаба 1:100000 (для корректной географической привязки); — цифровые тематические карты слоев населенных пунктов, рек, лесов масштаба 1:100000 (для исключения из анализа зон, не соответствующих сельскохозяйственным землям);

— данные о тестовых (эталонных) участках; архивные материалы космической съемки, которые можно применять для исследования;

— космические снимки с разрешением не хуже 30 м, полученные (желательно) в октябре-ноябре,

марте-апреле (целесообразно получить осенний и весенний снимок одной и той же территории).

ACTUAL PROBLEMS OF AGRARIAN LAND RESOURCES CONTROL AND WAYS OF THEIR SOLUTION WITH THE USE OF SPACE SURVEYS DATA

*V. I. Voloshyn, Ye. I. Bushuyev, O. I. Parshina,
A. Y. Pankratov, A. M. Glushchenko*

The evaluation of areas under winter crops with estimation of crops state is carried out using space images. The method is intended for introducing agrometeorological support in practice.

УДК 553.98(477+575.18+571.66):558.8.003

© В. І. Волошин¹, Є. І. Бушуєв¹, О. І. Паршина¹, О. П. Федоров²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

МЕТОДИКА КЛАСИФІКАЦІЇ ПОКРИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛАНДШАФТУ

Розроблюється методика створення тематичної карти ландшафтних елементів за даними дистанційного зондування Землі, яка буде максимально формалізованою і доступною методикою для широкого кола користувачів.

Більшість робіт з досліджень елементів ландшафту на базі даних дистанційного зондування [1—5] присвячено класифікації ландшафту конкретної географічної зони або одного з об'єктів ланшафту — дельти річок, берегової лінії, заповідника тощо. Серед методів класифікації використовуються переважно традиційні методи контролюваної класифікації, а в останній час — метод нейронних мереж. Але переважна частина робіт носить авторський характер, що обмежує ефективне використання методики іншими операторами. Тому стає актуальну задача зробити її максимально формалізованою і доступною для використання широким колом користувачів, що і є головною метою даної роботи.

Методика розроблена у відповідності з «Вимогами до структури (складу) методичної документації щодо оброблення даних ДЗЗ. АЛФА.99.0014.059 ПР, 2004 р.» (ДП «Дніпрокосмос»), які у теперішній час відіграють роль нормативного документу НКАУ, має технологічний паспорт обробки, необхідні демонстраційні приклади. Вона призначена для виділення меж та кількісної оцінки площ, що зайняті окремими покривними елементами земної поверхні та застосовується з метою:

— формування базової тематичної космокарти земної поверхні території України масштабу 1:100000, актуалізованої для терміну спостереження;

— оцінки динаміки окремих покривних елементів земної поверхні;

— подальшої тематичної класифікації і дешифрування у межах окремих покривних елементів земної поверхні.

Методика орієнтована на використання даних ДЗЗ в оптичному діапазоні, у першу чергу супутників «Січ-1М» (МСУ-ЕУ) та «Метеор-3М» (МСУ-Е), як найдоступніших для українського користувача, а також IRS (LISS), Spot, Landsat, Terra(Aster) тощо.

Кінцевий інформаційний продукт (КІП) — тематична карта покривних елементів земної поверхні масштабу 1:100000.

Тематична карта включає такі елементи: водні об'єкти; багаторічна рослинність (ліси та балки); сільськогосподарські угіддя на стадії вегетації; сільськогосподарські угіддя під паром та ґрунти, що не вкриті рослинністю; елементи міської забудови, дороги, аеропорти, мости тощо.

Дешифрувальні ознаки розподіляються на три

групи: прямі — спектральні яскравості об'єктів; непрямі — властивості об'єктів, пов'язані із набором прямих ознак (вегетаційний індекс, головні компоненти та ін.); контекстуальні (топологічні) — властивості об'єктів земної поверхні, що визначаються із аналізу ознак об'єктів його оточення.

Ознаки дешифрування різних груп мають різні індикаційні властивості. Не завжди прямі ознаки є найвірогіднішими. Практично завжди кількість непрямих та контекстуальних ознак дешифрування перевищує кількість прямих.

Метод класифікації: оброблення даних виконується за допомогою контролюваної класифікації, або класифікації з навчанням.

Контрольвана класифікація — це процес групування пікселів до класів, що відповідають деяким навчальним множинам, визначенім оператором. Навчальні множини визначаються так званими областями інтересу (OI), що вибираються на зображені інтерактивно і повинні представляти собою однорідні угрупування пікселів. Перш ніж виконати контролювану класифікацію, необхідно визначити та оцінити розподільність створених навчальних множин. Для цього є дві процедури: розрахунок матриці розподільноті та візуалізація щляхом експорту визначених OI до п-вимірного візуалізатора, який дозволяє оцінити угрупованість кожної OI та перехрещення навчальних множин між собою.

Значення похибок обробки даних вважаються задовільними для класифікації, і можуть уточнюватися на етапах подальшої розробки методики, такі: загальна похибка класифікації — 80 %, похибки визначення координат — 70 м, відстані — 5 %, площа, 5 %.

Багатоспектральні дані оптичної апаратури повинні бути надані в зеленому, червоному і близькому ІЧ-діапазонах електромагнітного спектру. Характеристики оптичної апаратури конкретних КА наведені у табл. 1.

Вхідні дані повинні бути радіометрично та геометрично нормалізовані і не повинні потребувати операцій усунення завад.

Візуальний контроль якості вхідних даних виконується під час перегляду на дисплей. Далі може бути виконаний контроль якості вхідних даних за відношенням «сигнал/шум» за допомогою процедур згладжування залишку (ДП «Дніпрокосмос». Программное изделие «Обработка изображений высокой разрешающей способности» Руководство пользователя 25527406.00035-02). Процедура розраховує статистичні характеристики вхідних даних, виконує виділення пікселів завад на зображені та шуму. Значення відношення «сигнал/шум» повин-

Таблиця 1. Характеристики оптичної апаратури КА

Характеристики апаратури	МСУ-Е «Метеор-3М»	МСУ-ЕУ «Сія-1М»	LISS IRS/1C-1D
Спектральні діапазони, мкм			
зелений	0.5—0.6	0.5—0.59	0.52—0.59
червоний	0.6—0.7	0.61—0.69	0.62—0.68
ближній інфрачервоний	0.8—0.9	0.79—0.92	0.77—0.87
короткий інфрачервоний			1.55—01.70
Розмір піксела на місцевості, м			
поперек траекторії	37.9	32	23.5
вздовж траекторії	32	24	23.5(70.5)

не перевищувати 40.

Вимоги до допоміжних матеріалів (карти): цифрова карта України М 1:200000 має похибку взаємного положення контурів у плані ± 1.15 мм, похибка положення горизонталей по висоті становить ± 12 —24 м. Зважаючи на похибки векторної карти, рекомендується користуватись растрою картою М 1:100000. Ця карта була представлена в інтернеті окремими листами $6^\circ \times 4^\circ$ за довготою та широтою відповідно. Географічна прив'язка та мозайка цих карт до розміру окремих листів або адміністративних територій дозволить використовувати їх для точнішої прив'язки за опорними точками.

Перш за все необхідно виконати геокодування даних топографічної карти масштабу 1:100000. Ця робота містить такі операції:

- прив'язка до географічної системи координат окремих листів;

- мозайка листів та створення растрових геореференційованих файлів, що відповідають номенклатурному листу карти масштабу 1:5000000, або окремій території;

- створення програмного інтерфейсу доступу до окремого листа топографічної карти.

ДП «Дніпрокосмос» розроблено документ «Посібник по использованию в ГИС растровых топографических карт М 1:100000 АЛФА.81.0015.059-01 ОТ», що регламентує технічне виконання цієї роботи.

Операції при обробленні даних: послідовність виконання операцій оброблення даних наведена на рис. 1.

Методом оброблення даних є контролювана класифікація. Оператор виконує класифікацію з навчанням за одним із вирішувальних правил. Слід нагадати, що класифікація може вимагати проведення декількох ітерацій, якщо результати оцінки її якості виявляються незадовільними. Оператор повинен виконати наступні операції:

- визначити сигнатури, або навчальні вибірки даних;

- оцінити їхню статистику та розподілення;

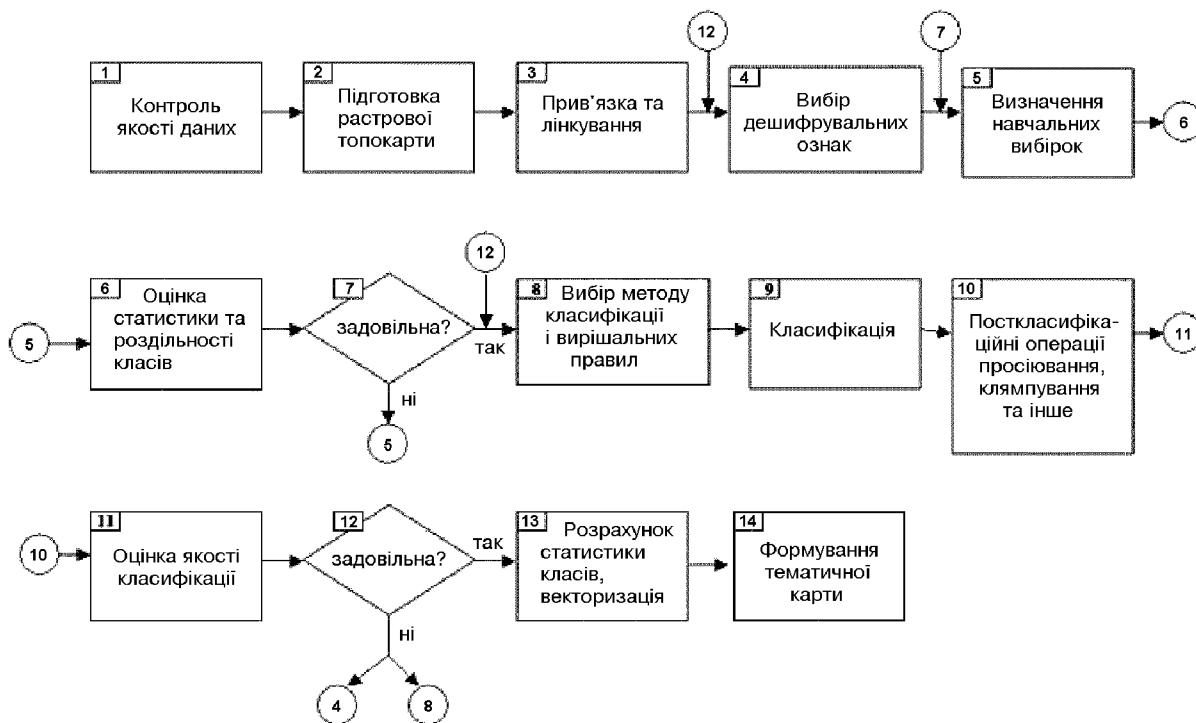


Рис. 1. Логічна модель вирішення тематичної задачі

- виконати класифікацію;
- провести оцінку її точності;
- вилучити із класів одиничні пікселі, використовуючи посткласифікаційні операції просіювання та клямпування, операції аналізу більшості;
- вилучити хмарність як клас на підставі інших даних тієї ж території (фрагментування хмарності та мозаїка результатів її вилученням із кінцевого продукту);
- обчислити статистику класів (за площею).

Контроль якості та інтерпретації результатів оброблення даних: для оцінки якості класифікації може бути створений спеціальний растроївий шар, що характеризує відстань кожного пікселя до центра його класу (так зване зображення відстані — *distance image*). На цьому зображені яскравіші пікселі мають більше віддалення від центра класу і з більшою імовірністю можуть бути віднесені до категорії некласифікованих об'єктів, темніші — групуються навколо центра класу. Рис. 2 надає вигляд гістограми зображення відстані. Такий розподіл має назву розподілу хі-квадрат. Некласифіковані пікселі мають більше значення відстані, і тому групуються у хвості гістограми.

У табл. 2 наведено графіки можливих функцій розподілу зображення відстані. Графіки 1 та 2 вказують на задовільну класифікацію, графіки 3, 4

свідчать про те, що класифікація не може бути виконана коректно.

Іншою мірою якості класифікації є дивергенція, що кількісно визначає відстань між класами й обчислюється за формулою

$$D_{ij} = 1/2 \operatorname{tr} [(C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1})] + \\ + 1/2 \operatorname{tr} [(C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)]^T$$

де i, j — індекси порівнюваних класів; C_i, C_j — коваріційні матриці; μ_i, μ_j — середні значення векторів (центри класів); tr — слід матриці.

Результати розрахунку дивергенцій оформляються окремим файлом розподільності класів, у якому містяться:

- значення дивергенцій для кожної пари класів (в одному каналі);
- середня і мінімальна дивергенція між наборами каналів (ці параметри зручно використовувати для підбору найінформативніших каналів).

Дивергенція приймає значення від 0 до 2.

Значення $D > 1.9$ вказують на гарну розподільність; значення 1.7—1.9 — на достатню, нижчі — на відсутність розподільності класів і як наслідок на неможливість коректної класифікації.

Для оцінки якості класифікації використовуються наземні тестові дані вигляді зображення, що

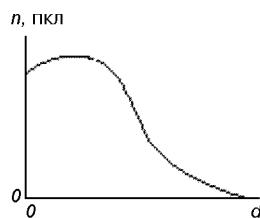


Рис. 2. Вигляд гістограми зображення відстані (n — кількість пікселів, d — відстань)

Таблиця 2. Графіки можливих функцій розподілу зображення відстані

Функція розподілу	Визначення порогу — ідентифікація пікселів, що найбільш імовірно класифіковані невірно
1	
2	
3	
4	

було отримано раніше і має в своєму наборі множину визначених класів, або тестові дані, отримані польовим шляхом з використанням координатної прив'язки і підтвердженням даних на місцевості.

Для оцінки якості класифікації використовуються також GPS-зйомки з метою визначення координат на місцевості та візуальний контроль з метою визначення меж та наявності отриманих в результаті тематичної обробки класів даних.

Створення тематичної карти елементів ландшафту за даними ДЗЗ надасть можливість створення

даних за окремими масками, наприклад масками сільгоспугідь. Виключення чи навпаки, включення в обробку замаскованої таким чином території на основі наступних дистанційних даних (при умові точної прив'язки) дасть змогу їхнього подальшого детального дешифрування за обраною тематикою.

На теперішній час розроблено проект методики. Після проведення кваліфікаційних випробувань в ДП «Дніпрокосмос» та виготовлення експлуатаційної документації, методику передбачається передати до НЦУВКЗ.

1. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов: Пер. с англ. / Под ред. А. Н. Гельфана, Н. М. Новиковой, М. Б. Шадриной. — М.: РАСХН, 1999.—306 с.
2. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Котляр А. Л. Ландшафтная классификация и оценка фитометрических параметров растительного покрова с использованием многозональных снимков в оптическом диапазоне сканера МСУ-В КА «Океан-О» // Материалы III наради користувачів аерокосмічної інформації (20—24.11.2000 р., м. Київ). — Київ: Знання України, 2001.—С. 77—85.
3. Николаев В. И. Космическое ландшафтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.—81 с.
4. Федоровский О. Д. Про дешифрування космічних знімків природних ландшафтів // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві: Методичний посібник по тематичній інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок / Під ред. чл.-кор. НАНУ В. І. Лялька. — Київ: ЦАКДЗ ПГН НАНУ, 1999.—С. 46—49.
5. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г. и др. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа // Космична наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 76—83.

METHOD OF CLASSIFICATION OF INTEGUMENTARY LANDSCAPE ELEMENTS

V. I. Voloshyn, Ye. I. Bushuyev, O. I. Parshina, O. P. Fedorov

We develop the method for the determination of technology for creation of thematic map of landscape elements of the territory of Ukraine using remotely sensed data. The purpose of our investigation is maximum formalization and accessibility of the method for many users.

© В. И. Волошин¹, А. С. Левенко¹, Н. Н. Переметчик²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Управління з екології Дніпропетровської міської Ради, Дніпропетровськ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРОДЕ ДНЕПРОПЕТРОВСКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Розглядається необхідність контролю розвитку підтоплень та зсуvin природного і техногенного характеру на територіях міст України. Визначено засоби та методи моніторингу з використанням даних дистанційного зондування Землі.

Город Днепропетровск расположен по обоим берегам реки Днепр и занимает территорию около 397 км².

Его правобережная часть характеризуется высоким рельефом и эрозионной расчлененностью. На этой территории насчитывается 15 балок и более 20 оврагов общей площадью около пяти тысяч гектаров. Они сильно разветвлены, глубина вреза достигает 30—40 и более метров [6]. Издавна балки и овраги служили естественными стоками воды и выполняли функцию естественного дренирования. В настоящее время в связи с их засыпкой и застройкой в недавнем прошлом без должной инженерной подготовки эта функция утрачена, что стало одним из факторов повышения уровня грунтовых вод.

На правобережье преобладают лесовидные суглинки. В результате интенсивной хозяйственной деятельности в этих грунтах создан водоносный слой на глубине от 5 до 20 м. Иногда он выходит на поверхность земли. Тенденция подъема уровня грунтовых вод в Днепропетровске сохраняется на уровне 1—1.5 м ежегодно.

В условиях интенсивного техногенного воздействия активизировались опасные геологические процессы на 45 % городской территории.

Подъем уровня грунтовых вод в условиях интенсивной эрозии грунтов приводит к активизации обвально-оползневых процессов [4]. На территории Днепропетровска выявлено более 130 опасных в этом отношении участков площадью более 1000 гектаров. Из них самый большой — около 250 гектаров, расположен на жилом массиве Тополь, где 6 июня 1997 г. произошел «молниеносный» оползень природно-техногенного характера. В результате разрушен девятиэтажный 72-квартирный

жилой дом, школа на полторы тысячи учащихся, два детских комбината, трансформаторная подстанция, несколько гаражей, разрушены три с половиной километра водопроводно-канализационных и газовых труб, 11.8 км электрокабельных сетей [1].

Материальный ущерб и затраты по материальной компенсации составил около 144 миллионов гривень.

Днепропетровск — всего лишь один из 244 городов Украины, где подтопления и оползни являются делом обычным. Грунты городской территории на протяжении десятилетий постепенно насыщались водой, уровень грунтовых вод неуклонно поднимался.

Просадки поверхности характерны для лесовых пород. В Украине их мощность достигает от 3 до 80 м (на правобережье Днепропетровска до 40—50 м). Просадки лесовых толщ от собственного веса при замачивании достигают в Днепропетровске 0.3—0.6 м, в Никополе 1.0—1.4 м, в Запорожье 1.4—2.2 м.

Возникающие вследствие этого чрезвычайные ситуации в регионах Украины требуют принятие мер по их недопущению и предотвращению. Изучая тонкий поверхностный слой, нельзя забывать и об особенностях земной коры. Начиная с 1983 г., например, отмечается тектоническая активность территории Днепропетровска. В настоящее время на территории города выделены 77 неотектонических блоков, границы между которыми и есть активные зоны. Такие зоны с их подвижками являются дополнительным фактором возникновения оползней, деформаций и разрушений зданий.

В независимой Украине на протяжении многих лет в рамках МЧС проводятся аэросъемки с использованием спутникового тепловизорного комплекса высокого разрешения, преобразованного в специ-

альную авиационную лабораторию («Тавр-М»).

Комплекс располагается на самолете, оборудованном для проведения аэрофотосъемки, и производит прием глубинного теплового излучения, преобразуя электрические сигналы для формирования теплового изображения. Использование космического оборудования в авиационном комплексе позволило получить на водной и земной поверхности изотермы тепловой чувствительности [5] и определять под землей объекты размерами 4×8 см. Использование «Тавр-М» наглядно демонстрирует возможности космической аппаратуры для определения утечек из водонесущих коммуникаций, оказывающих техногенное воздействие на формирование подтоплений и оползней, определения границ опасных зон.

Для анализа ситуации и принятия управляемых решений в настоящее время могут использоваться данные космического дистанционного зондирования Земли космическими аппаратами новых поколений как в видимом диапазоне, так и в инфракрасном спектре излучений (ИК-излучения, «тепловой» снимок). Получение изображений высокого разрешения позволит со временем отказаться от дорогостоящей аэросъемки для комплексного анализа, включающего в себя:

- определение состояния неотектонических блоков в пределах городской территории и фиксация их подвижек во времени;
- определение зон подтоплений и оползней на территории города с контролем сезонного перемещения их границ и изучение течений подземных вод;
- «привязка» полученных данных к топографической карте;
- прогноз проявления опасных геологических процессов с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Используются данные зарубежных коммерческих спутников. Прежде всего это спутники США: «Ikonos» (г. Торонто, разрешение 1 м), «QuickBird» (г. Лонг-Монт, разрешение до 61 см в надире), «OrbView-3» (г. Дуллес, штат Вайоминг, разрешение 1 м).

Могут быть использованы снимки, предлагаемые на мировом рынке Израилем (разрешение 1.8 м), Индией (6 м), Францией и другими странами.

В связи с повышением разрешающей способности американских коммерческих спутников и снижением стоимости их снимков получение данных ДЗЗ может быть не очень затратным.

Известно, что стоимость панхроматических (черно-белых) космических снимков с разрешением 1 м в США уже снизилась до семи долларов за 1 км²: прогнозируется, что этот процесс продолжится с началом эксплуатации спутника «OrbView-3» и еще более ускорится при появлении аналогичных иностранных систем [3].

Эксплуатация отечественных спутников снизит зависимость от зарубежных компаний.

Комплексное аэрокосмическое дистанционное зондирование Земли должно включать в себя получение космических данных о тектоническом состоянии территории, зонах подтоплений и оползней в динамике их развития.

Тепловая аэрофотосъемка с целью получения заверочных данных может проводиться с меньшей периодичностью, чем обработка космических данных.

В таблице в качестве примера приведены основные характеристики двух тепловизорных систем.

Тепловая аэросъемка позволяет идентифицировать подземные объекты и получать данные по наличию трубопроводов и их эксплуатационному состоянию, элементам фундаментов зданий и сооружений, пустотам и подтоплениям. В сочетании с

Характеристики тепловизоров

Характеристика	ТАВР-М	DAIS-7915
Страна-разработчик	Россия (Казань)	США (Geophys. Environ. Research)
Тип системы	оптико-механический сканер	гиперспектральный сканер
Целевое назначение	детальное исследование промышленных районов, инженерных сооружений, контроль морской зоны	определение состава объектов земной поверхности
Спектральный диапазон, мкм	7.5...13.5	8.0...12.0
Общее поле зрения	4°40"	78°
Мгновенное поле зрения, мрад	0.05 (10")	1.1—2.2—3.3 (по выбору)
Простр. разрешение на высоте 2000 м, м×м	0.04×0.08	0.9...2.6×1.8...5.2
Простр. разрешение на высоте 8000 м, м×м	0.16×0.32	3.6...10.4×7.2...20.
Полоса обзора по высоте полета 2000 м, м×м	164	3200
Полоса обзора по высоте полета 8000 м, м×м	656	12800
Поток информации, Мб/с	5	3

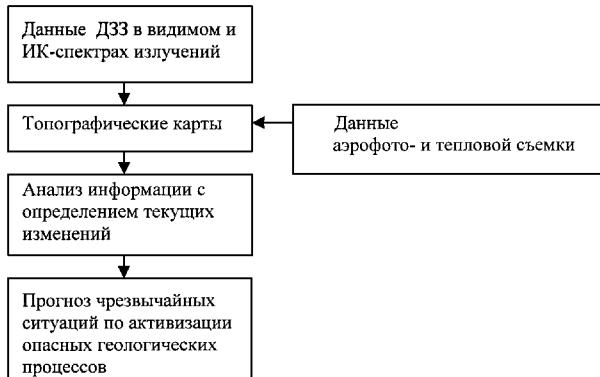


Схема мониторинга опасных геологических процессов

данными космического дистанционного зондирования Земли полученная информация станет основой мониторинга опасных геологических процессов в пределах территорий городов Украины.

Основы создания подобной методики уже заложены ГП «Днепрокосмос»: совместно с Институтом проблем природопользования и экологии НАН Украины проведено наложение данных по подтоплениям территории и оползнеопасным зонам города Днепропетровска на космокарту.

Основные принципы разработки методики прогнозирования активизации опасных геологических процессов на территории городов Украины следующие.

Методика может разрабатываться в рамках создаваемой в настоящее время системы СГИКО — космического информационного обеспечения НКАУ.

Основываясь на принципах системного анализа, заложенных в разрабатываемое космическое информационное обеспечение, методика может базироваться на структуре последовательных действий, приведенной на рисунке, и стать основой муниципальных ГИС-программ [2].

Полученный прогноз может применяться для принятия управленческих решений и использоваться в разрабатываемых в настоящее время во всем

мире муниципальных ГИС-программах. Например, разработкой муниципальных ГИС в Российской Федерации занимается отдел ГИС Института физики высоких энергий (Москва).

В соответствии с решением природоохранной коллегии Днепропетровского городского Совета в настоящее время планируются многолетние исследования экзогенных процессов на территории города Днепропетровска. Задача ГП «Днепрокосмос» — провести комплекс научно-технических работ по практическому применению данных ДЗЗ в рамках этих исследований.

1. Антонов Ю. Р., Левенко А. С. Опасные геологические процессы в Днепропетровске // Экополис: Экологический журн. Днепропетровского городского Совета.—2003.—№ 1(12).—С. 33—37.
2. Волошин В. И. Дистанционное зондирование для контроля эколандшафтной среды Днепропетровска // Экополис: Экологический журн. Днепропетровского городского Совета.—2003.—№ 1(12).—С. 43—46.
3. Еремченко Е. И. Космический мониторинг: новая политика США // Информ. бюл. ГИС-ассоциации.—2003.—№ 4(41).—С. 50.
4. Куличенко И. И., Волошин В. И. Левенко А. С. и др. Экология мегаполиса. Экологические аспекты промышленного развития Днепропетровска. — Днепропетровск.: Има-пресс, 2002.—368 с.
5. Макаров И. А. Аэрокосмический мониторинг // Экополис: Экологический журн. Днепропетровского городского Совета.—2000.—№ 1(9).—С. 54—55.
6. Павлов В. А., Переметчик Н. Н., Колотенко В. П., Шевченко Б. Е. Экологический паспорт города Днепропетровска. — Днепропетровск.: УкО Има-пресс, 2000.—112 с.

FORECAST OF MANIFESTATIONS OF DANGEROUS GEOLOGICAL PROCESSES IN DNIPROPETROVSK WITH THE USE OF METHODS OF AEROSPACE REMOTE SENSING OF THE EARTH

V. I. Voloshyn, A. S. Levenko, N. N. Peremetchik

We consider the need for control of development of underfloodings and landslips of natural and man-caused character on territories of Ukrainian towns. Means and methods of monitoring with the use of remote sensing data are determined.

© А. В. Руденко¹, Ю. В. Савельев², Э. З. Коваль¹,
Л. И. Ленова¹, Е. М. Волощук¹

¹Інститут урології АМН України, Київ

²Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Київ

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ГРИБОСТОЙКИХ ПОЛИУРЕТАНОВ ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Виходячи із особливостей структури синтезованих поліуретанів, яка дозволяє включати додаткові групи та гетероатоми, при конструкціонні грибостойких варіантів був використаний пасивний засіб захисту шляхом введення в структуру макромолекул іонів металів Zn, Cu, Sn, які були недоступні для мікроміцетів. Синтезовані поліуретани, макромолекула яких вміщує фрагменти ацетилацетонів олова, цинку, міді та свинцю, проявляли контактний фунгіцидний вплив на штами мікроміцетів, які належать до видів, що були виявлені у приміщеннях орбітальної станції. При цьому слід зауважити, що їхня активність проявлялась у пригніченні процесу проростання спор та збереження життєздатності у межах 3–10 діб, після чого спостерігався лізис клітинної оболонки.

В эпоху технического прогресса, сопровождающегося, с одной стороны, созданием новых материалов, с другой — появлением популяций агрессивных микроорганизмов, — все актуальнее становится необходимость контроля этого процесса в новых промышленных эконашах. Теоретически можно было предположить, что материалы, создаваемые путем искусственного синтеза, будут недоступными для известных деструкторов, поскольку подобные соединения в природе не встречаются, и адаптированных к ним микроорганизмов нет. Однако при этом не учитывалось, что несмотря на кажущуюся примитивность организации, микроорганизмы, как и все живые системы, характеризующиеся анизотропной структурой, не изолированы от влияния внешней среды, и между ними происходит многообразный обмен веществ и энергии. У микроорганизмов это проявляется в наличии специфических ферментов, обеспечивающих функционирование и конкурентность даже в экстремальных условиях освоения неростовых субстратов. Недооценка этих способностей микроорганизмов привела к тому, что в последние десятилетия появилось огромное количество промышленных отходов, состоящих преимущественно из синтетических полимеров. Свалки превратились в естественные источники формирования наиболее активных деструкторов, количество спор которых в воздухе катастрофически увеличивается. Это явление настораживает не только специалистов технического профиля, но и медиков, поскольку эти микроорганизмы (бактерии и грибы) являются причинными факторами инфекционно-воспалительных заболеваний человека и животных.

Согласно данным статистики, где учтены все виды биоповреждений, в условиях экологического мониторинга наибольший ущерб причиняют мицелиальные, «плеснеобразующие» грибы, — мицелии [7]. В настоящее время известно более 500 их видов, которые являются активными деструкторами различных полимеров [9].

Способность многих видов грибов выдерживать экстремальные условия промышленных эконаш и осваивать труднодоступные неростовые субстраты, в которых лимитированы источники азота и углерода при предельно низком содержании активной воды, не позволяет достоверно прогнозировать грибостойкость создаваемых полимеров. В связи с этим возникает необходимость тщательной предварительной оценки конструируемых полимеров по критерию их способности контролироваться и разрушаться мицелиями. Стандартные методы испытаний на грибостойкость основаны на принципе создания для тест-культур максимально благоприятных условий развития при инфицировании ими различных материалов и культивирования в режиме стабильных температур (+26...+28 °C) и влажности (80...90 %) [10]. Однако моделирование этих процессов в лабораторных условиях не всегда может гарантировать достоверность оценки, поскольку между термодинамическими явлениями на границе «живая система — внешняя среда» и внутриклеточными процессами есть прямая связь. Для спор грибов, находящихся на образце полимера, внешней средой является не только этот субстрат, но и окружающее его пространство, подвергающееся многофакторному влиянию. В связи с этим

учесть все составные экологического воздействия на грибную клетку не представляется возможным без физиологических и биохимических характеристик соответствующего вида микодеструктора, а также показателей изменения структуры материала, его старения и продуктов превращения, что в свою очередь обусловлено условиями эксплуатации.

Полиуретаны (ПУ) относятся к группе материалов, перспективных для защиты от микодеструкции различных металлических и деревянных конструкций, которые используются в условиях повышенной влажности [12, 15]. Проблема создания грибостойких ПУ, используемых в специфических условиях замкнутого пространства, служащего рабочим и жилым помещением в течение длительного времени, становится все актуальнее [14, 17]. В настоящее время нет универсальных, идеальных средств и методов дезинфекции, гарантирующих стерильность даже в помещениях, герметически изолированных от контакта с внешней средой. Несмотря на кажущуюся возможность обеспечения контроля санитарной ситуации, предотвратить контаминацию и избежать развития грибов практически не удается. В помещениях пилотируемых орбитальных космических станций после многолетней эксплуатации на поверхности интерьера и оборудования обнаруживали колонии бактериально-грибных ассоциаций [2–5, 8]. Многие из обнаруженных видов грибов были выделены также с поверхности тела самих космонавтов, что значительно усиливает важность проблемы защиты, поскольку выделенные микромицеты являются причиной аллергических состояний и микозов [11, 18]. В связи с этим основой решения проблемы является повышение грибостойкости ПУ путем придания им свойств, обеспечивающих ингибирование функционирования микромицетов, начиная со стадии адгезии спор при контаминации, но с учетом безвредности применяемых средств и полимеров для человека [13]. Разработка таких средств основана на использовании двух форм ингибирования процесса роста — активной и пассивной. Активная предполагает применение фунгицидных препаратов путем нанесения их на поверхность материала в виде суспензий, паст, защитных пленок, лаков и т. д., включающих соответствующие ионы металлов, природные фитотоксины, вещества микробного происхождения (антибиотики, микотоксины, генерики и т. д.), а также синтезированные органические соединения [5, 15, 16, 19]. Срок действия таких препаратов ограничен вследствие летучести их составных, распада структуры под влиянием воздействия внешней среды, обуславливающих старение материала, а также

свойств микромицетов, способных сорбировать ионы металлов на клеточной оболочке, не допуская проникновения их в клетку.

Пассивная защита предполагает химическую модификацию структуры материала на молекулярном уровне, обеспечивающей недоступность для использования микромицетами данного материала и одновременное блокирование известных путей их метаболизма — Эмбдена — Мейергофа — Парнаса, глюкозо-монофосфатного и цикла трикарбоновых кислот.

Исходя из особенностей структуры синтезируемых ПУ, которая позволяет включать дополнительные группы и гетероатомы, при конструировании грибостойких вариантов был использован пассивный способ защиты путем введения в структуру макромолекул металлов Zn, Cu, Sn, которые были недоступны для микромицетов [14].

При конструировании грибостойких ПУ путем использования металлсодержащего компонента исходили из предположения, что фунгицидное воздействие должно характеризоваться не только эффективностью по отношению к микодеструкторам, но и не ухудшать эксплуатационные свойства защищаемого материала. А главное — быть нетоксичным по отношению к людям и всем компонентам биосферы, что в данном случае использования в закрытых помещениях орбитальных станций может обеспечиваться целостностью структуры материала и отсутствием высвобождения в окружающее пространство фунгицидных элементов. При этом полимерные материалы действуют на грибы только контактным способом, т. е. грибостойкость материала гарантируется при непосредственном попадании спор на его поверхность. На споры, имеющиеся в воздухе, материал не действует.

Механизм взаимодействия грибной клетки с металлами окончательно не выяснен [15]. Многовековой опыт накоплен по применению ионов Zn, Cu, Sn в борьбе с фитопатогенными грибами, что и послужило базисом для использования их против микодеструкторов. Главная роль плазмидной резистентности грибной клетки принадлежит клеточной оболочке, которая контролирует не только функции клеточного метаболизма и роста, но и адгезивные и антигенные свойства, транспорт веществ в клетку и обратно, устойчивость к воздействию токсических веществ, в том числе и ионов металлов. Она также охраняет внутреннее содержимое клетки от воздействия экстремальных факторов. Клеточная оболочка микромицетов состоит из биополимеров, включающих разные блоки: моносахарины, аминосахара, хитин аминокислоты, мукополисахариды (полимеры галактозамина), которые

обеспечивают адгезию к поверхности субстрата. Ионы металлов связываются грибной клеткой в течение нескольких минут. А образующиеся комплексы локализуются во фракциях клеточных стенок и клеточных мембран. Фунгицидность соответствующих ионов металлов определяется в том числе уровнем асимметричного распределения их ионов между средой и грибной клеткой, а также транспортом из среды в клетку и обратно. У ряда видов микодеструкторов процесс транспорта ионов металлов протекает с высоким уровнем энергии метаболизма. Это отмечено для ионов K, Mn, Cu, Zn, Co, Ni, Li и т. п. Ингибиование метаболизма регулируется количеством ионов, поступающих в клетку, транспорт которых зависит от конкретных условий существования системы «микромицет — ПУ — внешняя среда». Механизм фунгицидного действия металлоксодержащих сополимеров обусловлен отщеплением из боковых Zn- и Sn-содержащих групп продуктов гидролиза (гидроксидов трибутилолова и цинка), губительно действующих на микромицеты [1, 16].

Механизм фунгицидного воздействия синтезированных ПУ методом включения металлоксодержащих фрагментов в структуру макромолекул ПУ пока можно объяснить по аналогии с другими способами проявления токсического воздействия на грибную клетку.

Учитывая специфику формирования комплексов микромицетов на различных ПУ, их динамику роста и активность, для проведения исследований по установлению фунгицидности был осуществлен предварительный скрининг по отбору наиболее активных тест-культур на образцах, не содержащих металлоганических фрагментов. Для опытов использовали штаммы, которые выделены из помещений орбитальных станций [4, 6]. Наиболее активными оказались штаммы *Aspergillus niger*, *Penicillium expansum*, *P. chrysogenum* и *Aspergillus oryzae*.

Синтезированные полиуретаны, макромолекула которых содержит фрагменты ацетилацетонов олова, цинка, меди и свинца, проявляли контактное фунгицидное действие. При этом следует отметить, что активность его проявлялась в ингибиравании процесса прорастания спор и сохранения жизнеспособности в пределах 3—10 сут, после чего наблюдался лизис клеточной оболочки. Контроль состояния жизнеспособности продолжали 40 сут, после чего были сделаны окончательные выводы о фунгицидном воздействии ПУ. Очевидно, механизм действия синтезируемых ПУ на грибную клетку включает стрессовый фактор, ингибирующий метаболизм. Поскольку у микромицетов, помимо имею-

щихся у всех эукариот макроэргических соединений (нуклеозидтрифосфатов), имеется еще и альтернативный вариант доноров фосфора и энергии (неорганические полифосфаты), которые, кроме процессов запасания и расходования энергии, участвуют в поддержании ионного баланса, в структурной организации клеточной оболочки, а также в регуляции активности ферментов метаболизма ДНК, РНК, полисахаридов, а также в регуляции экспрессии генов. Пролонгированный контроль жизнеспособности, ее потери и возобновления должен проводиться с учетом экстремофильных возможностей грибной клетки.

Защитные мероприятия по поддержанию необходимого санитарно-гигиенического уровня в помещениях орбитальных станций не должны ограничиваться только применением материалов, обладающих фунгицидными свойствами. Поскольку постоянного инфицирования орбитальной станции не происходит в связи с ее герметичностью, то занесенную до старта инфекцию можно улавливать специальными ловушками, что одновременно может ингибиовать активность спор, находящихся в воздухе. Очевидно, необходимо создать специальную технологическую схему гарантированной защиты от микромицетов в Космосе.

1. Андреева Е. И., Ахматова Н. И. Механизм действия фунгицидов // Микол. и фитопатол.—1985.—19, вып. 3.—С. 268—276.
2. Викторов А. Н., Новикова Н. Д., Дешевая Е. А. Микрофлора кабин пилотируемых космических объектов и проблема биоповреждений // Авиакосм. и экологическая медицина.—1992.—№ 3.—С. 41—48.
3. Викторов А. Н., Новикова Н. Д., Дешевая Е. А. и др. Актуальные проблемы микробиологической безопасности среды обитания орбитальных станций в условиях многолетней эксплуатации // Авиакосм. и экологическая медицина.—1995.—С. 51—55.
4. Викторов А. Н., Новикова Н. Д., Дешевая Е. А. Результаты микробиологических исследований. // Орбитальная станция «Мир». — М., 2001.—Т. 1.—С. 121—151.
5. Дешевая Е. А., Новикова Н. Д., Поликарпов Н. А. и др. Методы профилактики микробиологических повреждений интерьера и оборудования космических объектов // V Междунар. научно-практическая конф. «Современные проблемы биологических повреждений материалов. Биоповреждения—2002», Пенза, 19–20 ноября 2002 г. — Пенза: Дом науч.-техн. пропаганды, 2002.—С. 81—82.
6. Каневская И. Г., Орлова Е. Н. Микрофлора полимерных материалов и особенности ее формирования // Микол. и фитопатол.—1983.—17, вып. 3.—С. 189—200.
7. Коваль Э. З., Сидоренко Л. П. Микодеструкторы промышленных материалов. — Киев: Наук. думка, 1989.—192 с.
8. Козловский А. Г., Желифонова В. П., Антипова Т. В. и др. Штамм-резидент *Penicillium expansum* 2-7, ставший доминантным в ходе длительного космического полета орбитального комплекса «Мир», как продуцент антибиотиков ксантоциллина X и квостиомицина A // Успехи мед. микробиологии.—2004.—3.—С. 31—33.

9. Лугаускас А. Ю., Микульськіне А. И., Шляужене Д. Ю. Каталог микромицетов-биодеструкторов. — М.: Наука, 1987.—340 с.
10. Методы экспериментальной микологии. Справочник / Под ред. В. И. Билай. — Киев: Наук. думка, 1989.—550 с.
11. Руденко А. В., Коваль Э. З. Медицинские и санитарные аспекты мицодеструкции пищевых продуктов и промышленных материалов // Вісник Одеського національного університету.—2001.—6, вип. 4.—С. 266—269.
12. Савельев Ю. В. Полиуретаны, обладающие биологической активностью // Доповіді НАН України.—1997.—№ 11.—С. 147—151.
13. Савельев Ю. В., Греков А. П., Коваль Э. З., Веселов В. Я. Биостойкость линейных полиуретанов // Укр. хим. журн.—1997.—63, № 5/6.—С. 70—73.
14. Савельев Ю. В., Робота Л. П., Руденко А. В., Коваль Э. З. Полимерные материалы, стойкие к биокоррозии в условиях замкнутого пространства: пути создания // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 24—26.
15. Середницкий Я. А., Коваль Э. З., Теодорович Д. О. и др. Устойчивость к грибной коррозии и биологическому обращению некоторых полиуретановых эластомеров // Микробиол. журн.—1978.—40, № 1.—С. 20—25.
16. Чернорукова З. Г., Новоспасская Н. Ю., Емельянов Д. Н., Смирнов В. Ф. Новые олово- и цинкосодержащие полимеры для защиты материалов от биоразрушений // V Междунар. научно-практическая конф. «Современные проблемы биологических повреждений материалов. Биоповреждения — 2002», Пенза, 19—20 ноября 2002 г. — Пенза: Дом науч.-техн. пропаганды, 2002.—С. 118—120.
17. Molitoris H. P. Fungi in space-related research // Укр. ботан. журн.—1990.—47, № 5.—С. 70—77.
18. Taylor G. R. Henney M. R., Ellis W. Z. Changes in the fungal autoflora of Apollo Astronauts // Appl. Microbiol.—1973.—26, N 5.—P. 804—813.
19. Wang Daxi, Li Shuyuan, Ying Yu., et al. Theoretical and experimental studies of structure and inhibition efficiency of imidazoline derivatives // Corr. Sci.—1999.—41, N 10.—P. 1911—1919.

CONCEPTUAL ASPECTS IN CREATION OF FUNGUS-RESISTANT POLYURETHANS HAVING SPECIAL PURPOSE

A. V. Rudenko, Yu. V. Saveliev, E. Z. Koval,
L. I. Lenova, E. M. Voloschuk

Based upon peculiarities of the structure of synthesized polyurethanes which allows one to include additional groups and heteroatoms in the process of construction of fungus-resistant variants, the passive way of protection by means of introducing the Zn, Cu, Sn ions of metals (they were inaccessible for micromycetes) into the structure of macromolecules is used. The synthesized polyurethanes, the macromolecule of which contains the fragments of Sn, Zn, Cu and Pb acetylacetones, manifested the contact fungicide action on those micromycet strains which were detected in the orbital station. It should be noted that its activity was demonstrated in inhibiting the process of spore sprouting and vitality maintaining during 3 to 10 days, with lysis of cell wall to follow.

УДК [578.864+633.11]:57.043:577.359

© Л. Т. Міщенко, В. В. Тороп, І. А. Міщенко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ВПЛИВ КЛИНОСТАТУВАННЯ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТКАНИН ВІРУСІНФІКОВАНИХ ЛИСТКІВ ПШЕНИЦІ

Подаються результати дослідження електропровідності тканин ін tactних листків пшениці сорту Апогей, інфікованої вірусом смугастої мозаїки та вирощеної за умов модельованої мікログравітації. Показано, що вимірювання електропровідності може бути ефективним для виявлення фізіологічних змін у рослинах, спричинених впливом дії абіотичного та біотичного чинників.

ВСТУП

При створенні автотрофної ланки в контролюваних екологічних системах життєзабезпечення космонавтів при тривалих космічних місіях необхідно здійснювати повний онтогенез здорових сільсько-гospодарських рослин кількох поколінь. Можлива присутність деяких мікроорганізмів та вірусів в екосистемі орбітальної космічної станції вимагає всебічного вивчення їхньої взаємодії з рослинами-хазяями в умовах модельованої мікログравітації. Перші дослідження в цьому напрямку проведено з рослинами пшеници різних сортів, інфікованими

вірусом смугастої мозаїки пшениці (ВСМП) [12, 13]. Імунологічними методами виявлено феномен елімінації вірусу після тривалого клиностатування уражених рослин [4, 5].

Для детальнішого вивчення особливостей фізіологічних процесів, що відбуваються в рослинах, інфікованих вірусом, в умовах модельованої мікログравітації на різних рівнях організації біологічних об'єктів та з'ясування механізмів цих взаємовідносин необхідно застосовувати сучасні прилади, точні експресні методи, що дозволяють проникати в саму сутність досліджуваних процесів і явищ, не пошкоджуючи при цьому рослину. На клітинному

рівні складні фізіологічно-біохімічні процеси та їхні адаптивні зміни зобов'язані функціям клітинних мембрани та органел. Дія стресових чинників призводить до пошкодження клітинних структур, і в першу чергу цитоплазматичних мембран — найчутливішого і найслабшого ланцюга. Застосовуючи біофізичні методи дослідження, можна дуже швидко отримати дані про ступінь дезорганізації авторегуляторного механізму у межах дії чинників зовнішнього середовища, при яких порушується координація реакцій.

Експрес-метод реєстрації зміни електропровідності (ЕП) застосовується для дослідження різноманітних фізіологічних процесів, що відбуваються в тканинах рослин як в оптимальних умовах, так і за стресових ситуацій [6, 8, 9]. Гравістимульовані зміни ЕП кореня досліджено в роботі [7]. Пошкодження цитоплазматичних мембран тканин рослин-хазяїв до і під час видимих змін в ході реакції надчутливості, індукованої вірусною інфекцією, спостерігали в роботі [15].

Мета нашої роботи — дослідити ЕП тканин інтактних листків рослин пшениці сорту Апогей при взаємодії двох чинників — біотичного (вірусна інфекція) та абіотичного (клиностатування).

ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експерименти проводили на універсальному клиностаті «Цикл-2» згідно з описаною раніше методикою [13]. Досліджували рослини пшениці суперкарликового сорту Апогей, створеного спеціально для вирощування на орбітальних станціях. Як об'єкт вірусологічних досліджень використовували ВСМП. В дослідних варіантах у фазі двох листків проводили інокуляцію соком хворих рослин на фосфатному буфері pH 7.2, а в контрольних — самим лише буфером. Виявлення антигену ВСМП в інфікованих рослинах здійснювали методом твердофазного імуноферментного аналізу (ІФА), das-ELISA, з використанням специфічних діагностичних сироваток та електронної мікроскопії [5]. Для кількісного визначення вмісту вірусу в тканинах листків використовували показники оптичної щільноти E продуктів ферментативної реакції, які вимірювали на рідері фірми Thermo Labsystems Opsi^{MR} з програмним забезпеченням Dynex Revelation QuicKlik (США) при довжинах хвиль 405/630 нм.

Відносну оптичну густину продуктів ферментативної реакції дослідних зразків визначали за формулою $E = E_i/E_k$, де E_i — оптична густина в ІФА інфікованого зразка, E_k — оптична густина в ІФА контролного зразка здорових рослин.



Рис. 1. Вимірювання електропровідності тканин листків пшениці електроміром Е7-13

Для модельних досліджень використовували різні злакові культури: пшеницю сортів Миронівська-65, Миронівська-67, Колективна-3, Одеська-167; вівси сортів Таращанський, Скаун; ячмені сортів Рось, Таращанський — інфіковані ВСМП; а також томати сорту «Грушка красная», інфіковані вірусом тютюнової мозаїки (ВТМ).

Електропровідність ЕП тканин листків пшениці сорту Апогей вимірювали на 14-ту добу після інфікування в мікросименсах ($\mu\text{См}$) електроміром Е7-13 (рис. 1), оснащеним двома голчастими молібденовими електродами, відстань між якими 9 мм [6]. В модельних дослідах визначали зміну ЕП₃ електропровідності тканин листків за формулою $E_{\text{П}_3} = |E_{\text{П}_i} - E_{\text{П}_k}|$, де ЕП₃ — абсолютне значення зміни, ЕП_i, ЕП_k — електропровідності тканин листків інфікованих та здорових рослин відповідно.

Вміст сухої речовини визначали ваговим методом на 34-ту добу після інфікування.

Схема досліду:

- Контроль
- Інфіковані рослини
- Контроль, вертикальне клиностатування, радіус обертання контейнерів $R = 1.6$
- Інфіковані рослини + вертикальне клиностатування, радіус обертання контейнерів $R = 1.6$
- Інфіковані рослини + горизонтальне клиностатування
- Інфіковані рослини + вертикальне клиностатування, радіус обертання контейнерів $R = 1.0$

Кількість рослин у вибірці — по три для кожного варіанту, кількість вимірювань — по десять для

кожної рослини (тридцять для варіанту). В таблицях наведено середні значення та їхні стандартні похибки ($M \pm \sigma$).

Статистичну обробку даних проводили за допомогою програм Microsoft Excel, AGROSTAT.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В модельних експериментах при апробації методу вимірювання ЕП тканин інтактних листків в комплексі з імунологічним та електронно-мікроскопічним методами діагностики нами встановлено його високу чутливість та придатність для виявлення первинних реакцій рослин на стреси, викликані абіотичними та біотичними чинниками. Вже через добу після інокуляції ВТМ томатів сорту «Грушка красна» виявлено істотні зміни в показниках ЕП уражених рослин (рис. 2).

ВСМП — найбільш поширений та шкодочинний специфічний патоген, який інфікує зернові культури, локалізуючись в цитоплазмі молодих листків [1]. Після штучної інокуляції інтенсивна репродукція вірусу починається на 12–14-ту добу. Він діагностується імуноферментними (ІФА), молеку-

лярно-генетичними, електронно-мікроскопічними методами [1, 5]. В цей період з'являються специфічні візуальні симптоми (хлоротичні плями та світло-зелені смужки). Методом вимірювання ЕП тканин інтактних листків виявлено особливості реакції на вірусну інфекцію у різних за чутливістю сортів зернових культур (рис. 3). Простежувалася пряма залежність (коефіцієнт кореляції $r = 0.81$) між зміною показників ЕП на 5-ту добу та відносною оптичною густину продуктів ферментативної реакції на 16-ту добу після інокуляції. У чутливих до вірусної інфекції культур та сортів вже на 5-ту добу після інокуляції, ще до появи візуальних симптомів захворювання, істотно зросли показники ЕП, тоді як у толерантних вони не змінилися або дещо знизилися. Зміна ЕП тканин, яка корелює з кількістю патогену, очевидно, зумовлена порушеннями цілісності клітинних стінок рослин-хазяїв під впливом вірусної інфекції у чутливих генотипів та захисними реакціями, що розвиваються у відповідь на біотичний стрес у толерантних сортів. Це узгоджується також з висновками роботи [2]. За зміною ЕП та кількістю вірусного АГ що виявляється в ІФА, досліджувані зернові культури розмістилися в такому порядку: пшениці Миронівська-67 > Миронівська-65 > Колективна-3 > Одеська-167 > вівси Таращанський > Скаун > ячмені Таращанський > Рось. Толерантність досліджуваних культур і сортів до вірусної інфекції в приведеному ряду зростає.

Після осіннього інфікування зареєстровано статистично достовірне зниження показників ЕП в базальній частині листкової пластинки хворих рослин пшениці, порівняно із здоровими в фазу цвітіння, яке можна використовувати як тестовий показник для попередньої експрес-діагностики вірусних хвороб у польових умовах (рис. 4). В наших дослідженнях, проведених на рослинах пшениці сорту Апогей, на 14-ту добу після інокуляції ВСМП світло-зелений хлороз з'явився лише в нерухомих інфікованих рослинах.

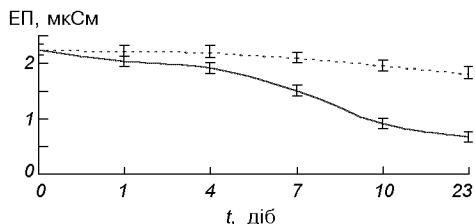


Рис. 2. Визначення ЕП томатів сорту «Грушка красная» в динаміці інфекційного процесу: суцільна лінія — ВТМ-інфікованих, пунктир — контрольних

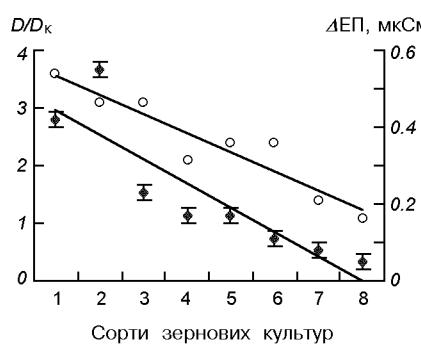


Рис. 3. Зміна ЕП на 5-ту добу та відносна оптична густина продуктів ферментативної реакції в ІФА на 16-ту добу після інфікування ВСМП: 1 — пшениця Миронівська-67, 2 — пшениця Миронівська-65, 3 — пшениця Колективна-3, 4 — пшениця Одеська-167, 5 — овес Таращанський, 6 — овес Скаун, 7 — ячмінь Таращанський, 8 — ячмінь Рось

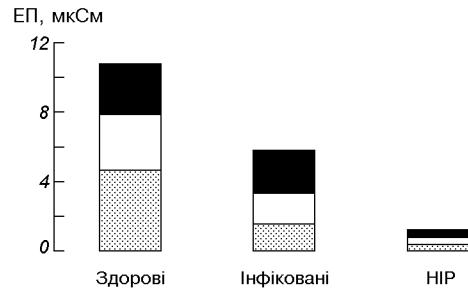


Рис. 4. Показники ЕП в різних ділянках листкової пластинки пшениці сорту Миронівська-65: чорний колір — верхня ділянка, білий — центральна, сірий — базальна ділянка. Найменша істотна різниця (НІР) на рівні 5 % дорівнює 0.40 мкСм

Таблиця 1. ЕП тканин листків пшеници сорту Апогей на 14-ту добу після інфікування

Варіант досліду	ЕП, мкСм	Зміна ЕП, % до контролів
Контроль	2.4±0.13	100
Інфіковані рослини	1.4±0.17	-41
Вертикальне клиностатування, здорові $R = 1.6$	1.6±0.12	100
Інфіковані рослини вертикальне клиностатування $R = 1.6$	1.9±0.15	+16
Інфіковані рослини горизонтальне клиностатування	2.05±0.13	+22
Інфіковані рослини вертикальне клиностатування $R = 1.0$	1.7±0.12	нестотна

Показники ЕП молодих листків рослин пшеници сорту Апогей, вирощених в умовах мікрогравітації та контрольних (нерухомих) на 14-ту добу після інфікування представлено в табл. 1. Виявлено істотне зниження ЕП тканин молодих інтактних листків рослин сорту Апогей, уражених вірусом, у порівнянні із здоровими — на 42 %, а також клиностатованих — у порівнянні з нерухомими — на 12—33 %, в залежності від радіусу обертання контейнерів.

За умов модельованої мікрогравітації при вертикальному клиностатуванні з радіусом обертання 1.6 показники ЕП інфікованих рослин зросли у порівнянні з контрольним варіантом на 16 %; при горизонтальному клиностатуванні — на 22 %, а при вертикальному клиностатуванні з радіусом обертання 1.0 — істотно не змінились. Зниження ЕП тканин листків при дії абіотичного чинника (клиностатування) викликане, очевидно, зміною стану клітинних стінок [3]. Вони в умовах мікрогравітації стають тоншими, втрачають кальцій, а отже, змінюється їхня проникність, листки легше втрачають воду, оскільки порушуються і процеси транспирації. У рослин при клиностатуванні збільшується вміст сухої речовини (табл. 2). Через 34 доби після інокуляції виявлено істотне підвищення вмісту сухої речовини в тканинах вірусінфікованих рослин по відношенню до контролю в статичних умовах та, відповідно, їхнє зниження — в умовах клиностатування. Простежується обернена залежність між ЕП тканин листків на 14-ту добу та вмістом сухої речовини на 34-ту добу після інфікування.

Досліджаючи вплив різних способів підживлення на ріст розсади в контейнерах, автори роботи [14] також виявили, що зразки з більшою сухою вагою мали меншу ЕП. Отже, зниження ЕП листків, уражених вірусною інфекцією, може бути зумовлене процесами старіння всього організму: на тканинному рівні — підвищеннем вмісту сухої речовини,

Таблиця 2. Вміст сухої речовини в тканинах листків пшеници сорту Апогей на 34-ту добу після інфікування

Варіант	Вміст сухої речовини, %	Зміна вмісту, % до контролів
Контроль	15.7±0.05	100
Інфіковані рослини	18.6±0.03	+16
Вертикальне клиностатування, здорові $R = 1.6$	18.0±0.04	100
Інфіковані рослини вертикальне клиностатування $R = 1.6$	16.0±0.02	-13
Інфіковані рослини горизонтальне клиностатування	14.8±0.02	+22
Інфіковані рослини вертикальне клиностатування $R = 1.0$	17.8±0.04	нестотна

а на клітинному рівні — зміною проникності мембрани та ультраструктурними перебудовами, що відбуваються внаслідок запрограмованої смерті клітин (апоптозу) [1].

В нашому досліді при горизонтальному та вертикальному клиностатуванні з радіусом 1.6 показники ЕП тканин листків інфікованих рослин істотно перевищували контроль і практично не відрізнялися від тих, що були зареєстровані для здорових нерухомих рослин. Слід зазначити, що у вірусінфікованих рослин за умов клиностатування не тільки не погіршуються, а навіть поліпшуються деякі елементи продуктивності.

Автори роботи [2] вважають, що у природних умовах вирішальна роль у взаємодії фітовірусів і рослин-хазіїв повинна належати останнім, у яких індукція апоптозу, що контролюється генами надчутливості, призводить до локалізації вірусу, некротизації інфікованих клітин, елімінації патогенів та розвитку стійкості до них.

Спираючись на роботи Є. Л. Кордюм [10, 11], в яких досліджено чутливість до мікрогравітації організмів на субклітинному та клітинному рівнях, ми схиляємося до думки, що репродукція про-каріотів в умовах клиностатування може пригнічуватися, в той час як у еукаріотів при взаємодії абіотичного та біотичного чинників індукується адаптивні реакції.

ВИСНОВКИ

Отже, виявлено істотне зниження показників ЕП тканин інтактних листків вірусінфікованих рослин суперкарликового сорту Апогей на 14-ту добу після інокуляції по відношенню до контролю в наземних умовах та їхнє підвищення — при горизонтальному та вертикальному клиностатуванні з радіусом обертання 1.6.

Метод вимірювання ЕП тканин інтактних листків ефективний для виявлення фізіологічних змін при дослідженні взаємодії вірусної інфекції з рослинами-хазяями в умовах модельованої мікрогравітації.

1. Бойко А. Л., Силаєва А. М., Мищенко Л. Т., Решетник Г. В. Особливості ультраструктурної організації клітин мезофілу озимої пшениці за умов вірусної інфекції // Цитологія и генетика.—1997.—31, № 5.—С. 71—78.
2. Колесник Л. В., Щербатенко І. С. Особливості інфекційного процесу і захисних реакцій у протоклонів тютюну, відібраних за стійкістю до вірусу тютюнової мозаїки // Доповіді Національної академії наук України.—2003.—№ 1.—С. 161—166.
3. Кордюм Е. Л., Сытник К. М., Белявская Н. А. и др. Современные проблемы космической клеточной фитобиологии. — М.: Наука, 1994.—293 с.
4. Мищенко Л. Т., Бойко А. Л., Чернік С. О. Вплив кінотатування на показники серологічного аналізу вірусу смугастої мозаїки в рослинах *Triticum aestivum* L. // Біополімеры и клетка.—1999.—15, № 4.—С. 319—323.
5. Мищенко Л. Т., Куне Т., Мищенко І. А., Бойко А. Л. Инфекционный процесс вируса полосатой мозаики (ВПМП) в клиностатированных растениях пшеницы Апогей // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 211—215.
6. Тороп В. В. Застосування електрометричних методів у садівництві // Проблеми моніторингу в садівництві. — К.: Аграрна наука, 2003.—С. 145—154.
7. Behrens H. M., Weisenseel M. H., Sievers A. Rapid changes in the pattern of electric current around the root tip of *Lepidium sativum* L. following gravistimulation // Plant Physiol.—1982.—70.—P. 1079—1083.
8. Fensom D. S. On electrical resistance in situ in higher plants // Canadian J. Plant Science.—1986.—46, N 2.—P. 169—175.
9. Harker F. R., Maindonald J. H. Changes in the cell wall, vacuole and membranes detected using electrical impedance

- measurements // Plant physiology.—1990.—106, N 1.—P. 165—171.
10. Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // Int. Rev. Cytol.—1997.—171.—P. 1—78.
11. Kordyum E. L. Plant growth and development in microgravity // International conference on plant ontogenesis in natural and transformed environments, July 1—4. — Львів: СПОЛОМ.—1998.—P. 11—13.
12. Mishchenko L. T., Silayeva A. M. Effect of Clinostating on Physiological and Biochemical Characteristics of Wheat Plants Infected by the Streak Mosaic Virus of Wheat (SMVV) // Horticulture & Vegetable Growing (Lithuania).—1998.—17, N 3.—P. 386—394.
13. Mishchenko L. T., Silayeva A. M., Boyko A. L. Effect of simulated microgravity on the virus-infected wheat plants // Abstracts 31st Scientific Assembly of COSPAR 14—21 July, 1996.—The University of Birmingham, England.—P. 385.
14. Purvis P., Chong C., Lumis G. P. Recirculation of nutrients in container nursery production // Canadian Journ. of plant science.—2000.—80.—P. 39—45.
15. Wright K. M. Duncan G. H., et al. Analysis of the N gene hypersensitive response induced by a fluorescently tagged tobacco mosaic virus // Plant Physiology.—2000.—123.—P. 1375—1385.

CLINOROTATION EFFECTS ON VIRUS INFECTED WHEAT LEAF TISSUE ELECTRIC CONDUCTIVITY

L. T. Mishchenko, V. V. Torop, I. A. Mishchenko

We present our results on the electric conductivity of Apogee wheat leaf tissue infected with wheat streak mosaic virus and grown under simulated microgravity conditions. It is shown that the electric conductivity measurements may be effective in the detection of physiologic changes in plants caused by the impact of abiotic and biotic agents.

© Н. Ф. Гамалея, Е. Д. Шишко, О. Б. Горобец

Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р. Е. Кавецького
НАН України, Київ

КЛЕТОЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕННОЙ ГРАВИТАЦИИ НА ЦИРКАДИАННУЮ РИТМИКУ ЧЕЛОВЕКА

Однією з найважливіших медико-біологічних проблем, пов'язаних з космічними польотами людини, є порушення нормальної часової організації фізіологічних процесів в організмі космонавта: сну, ритмів «спокій-активність», температурної регуляції, метаболічного гомеостазу. Розробка шляхів запобігання цим несприятливим ефектам чи їхнього усунення вимагає фундаментальних досліджень, направлених на з'ясування характеру впливу факторів космічного польоту на хронобіологічну архітектоніку організму людини. Встановлено, що лімфоцити крові людини містять світлоочутливий циркадіанний годинник, і культуру цих клітин можна використати як унікальну модель для досліджень впливу космічних факторів, зокрема зміненої гравітації, на циркадіанну (добову) ритміку людини.

Одной из наиболее серьезных медико-биологических проблем, возникающих в связи с пребыванием

204

человека в космосе, является нарушение нормальной временной структуры всех основных физиоло-

гических функций организма. Для изучения влияния

гических процессов в организме космонавта. Это приводит к развитию состояния так называемого десинхроноза, нарушению сна и ритмов «покой-активность» [13, 16, 21], температурной регуляции тела и метаболического гомеостаза [11, 20, 22]. Вследствие этого у человека ухудшается самочувствие и снижается работоспособность. Разработка путей предотвращения этих неблагоприятных эффектов или их устранения требует фундаментальных исследований, направленных на выяснение характера влияния космических факторов на хронобиологическую архитектонику организма человека. Естественно, что такие исследования были бы значительно облегчены, если бы существовала модель, позволяющая проводить биоритмологические эксперименты с клетками человека *in vitro*. Однако до сих пор подобные модели не были предложены.

Лимфоциты как легко доступные человеческие клетки неоднократно использовались в медико-биологических космических экспериментах для изучения эффектов микрогравитации на митогенную и антигенную активацию клеток [6—8, 10, 14, 23], их локомоторную активность [9, 17], процессы сигнальной трансдукции [14, 17]. Однако в космических экспериментах хронобиологического характера человеческие лимфоидные клетки до сих пор не использовались.

Нами разработана простая и доступная клеточная модель для изучения влияния измененной гравитации на циркадианную (суточную) ритмику человека. Модель основана на культивировании *in vitro* лимфоцитов, выделенных из периферической крови человека.

Материал и методы. Предложенный подход базируется на использовании иммунологической реакции взаимодействия эритроцитов с поверхностью лимфоидных клеток (т. н. реакция активного Е-розеткообразования Е-РОК) [15]. Кровь для исследований брали из локтевой вены здоровых доноров-добровольцев. Донорами были мужчины 20—35-летнего возраста. Лимфоциты из свежевзятой гепаринизированной (20 ед./мл) крови выделяли центрифугированием на градиенте фиколл-верографин ($d = 1.077$), трижды отмывали от фиколл-верографина физиологическим раствором Хенкса pH = 7.2. Все процедуры выполняли в стерильных условиях с использованием стерильных растворов. Жизнеспособность выделенных лимфоцитов в тесте с трипановым синим составляла не менее 95 %. Лимфоциты культивировали при концентрации $2 \cdot 10^6$ клеток/мл в питательной среде RPMI-1640 без фенолового красного с добавлением 10 % эмбриональной сыворотки крупного рогатого скота, 2 mM L-глютамина и 80 мкг/мл гентамицина, при темпе-

ратуре $t = 37^\circ\text{C}$ в воздушной среде с 5 % CO₂. Е-розеткообразующую активность лимфоцитов определяли на протяжении суток через каждые 4 часа: в 9, 13, 17, 21, 1 и 5 ч.

Методика постановки реакции активного Е-розеткообразования соответствовала ранее описанной [15]. Во всех выбранных временных точках суток реакцию ставили в трех повторностях. В каждом препарате анализировали по 1000 лимфоцитов и определяли долю розеткообразующих клеток. Таким образом, данные для каждой временной точки представляли собой результат подсчета 3000 лимфоцитов.

Для подтверждения наличия циркадианных ритмов полученные хронограммы анализировали статистически с применением парного t-теста Стьюдента.

В опытах по изучению влияния измененной гравитации на суточный ритм Е-розеткообразования лимфоцитов человека использовали горизонтальный клиностат со скостью вращения 2-4 об./мин.

Результаты. Ранее нами было показано [1, 2], что Е-розеткообразующая активность лимфоцитов здоровых доноров закономерно изменяется на протяжении суток, причем максимум активности проявляется около полудня (13 ч), а минимум — в полночь (1 ч). Этот ритм Е-розеткообразования сохраняется у лимфоцитов и при культивировании *in vitro* на протяжении 10 суток (рис. 1). Кроме того, установлено, что циркадианные ритмы свежезализированных лимфоцитов, содержащихся в течение суток в питательной среде при комнатной температуре или при $t = +4^\circ\text{C}$ и тестировавшихся через каждые 4 часа, были близки к суточным кривым Е-розеткообразования лимфоцитов при взятии крови у доноров 6 раз в течение суток в те же временные точки. Таким образом, лимфоциты человека оказались способными сохранять на протяжении 10 сут культивирования *in vitro* в темноте циркадианный ритм Е-розеткообразующей активности, характерный для них в организме человека (*in vivo*).

Механизмы отсчета времени («биологические часы») в многоклеточном организме считались ранее атрибутом только нервных структур. Однако в последние годы такие часы были найдены во многих периферических тканях и органах, полученных от животных различных классов и поддерживаемых в условиях культуры [4, 5, 12, 18]. Некоторые из этих часов оказались светочувствительными и могли «подводиться» светом [19, 24]. Однако на человека такие исследования не распространялись из-за отсутствия известных ритмических реакций, пригодных для наблюдения *in vitro*. Обнаруженное нами сохранение лимфоцитами человека *in vitro*

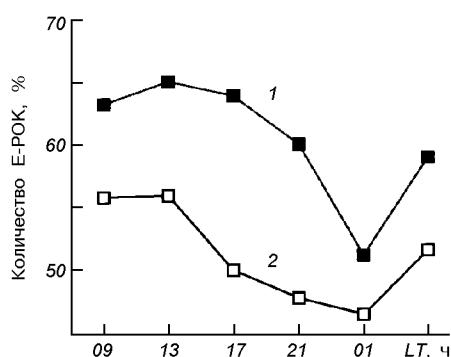


Рис. 1. Циркадианный ритм Е-розеткообразующей активности лимфоцитов (Е-РОК) после 10 сут культивирования в темноте:
1 — первые сутки, 2 — 11-е сутки

суточного ритма Е-розеткообразующей активности свидетельствовало о том, что эти клетки содержат эндогенные циркадианные часы, и следовательно, могут служить адекватной моделью для хронобиологических исследований.

Представлялось вероятным, что время этих часов (т.е. фазы верхнего и нижнего экстремумов суточного ритма) устанавливалось в организме естественной сменой дня и ночи (циклами «свет-темнота»), тем более что в более ранних исследованиях [3] нами была показана высокая чувствительность лимфоцитов человека к видимому, в частности красному свету. (Известно, что до сосочкового слоя дермы кожи человека, в капиллярах которого может одновременно находиться около 1 л крови, доходит более 30 % красной составляющей солнечного спектра). В случае подтверждения этого предположения была возможность «перестановки» часов искусственными циклами освещения.

Для проверки этих представлений в дальнейших экспериментах культивировавшиеся клетки освещали через плоское дно культуральных фляконов проекционной лампой, свет которой подавался в термостат по фиброоптическому световоду. При этом использовали относительно монохроматический широкополосный свет, полученный с помощью сине-зеленого (полоса пропускания $\lambda\lambda = 400...570$ нм) или красного фильтров (излучение с длиной волны более 600 нм). Плотность мощности излучения составляла 0.5 Вт/м². Клетки культивировали при одном из двух противоположных режимов освещения: одни культуры освещались с 8 ч до 20 ч, другие — с 20 ч до 8 ч. В качестве контроля часть культур содержалась в постоянной темноте. В предварительных опытах мы определили, что для перевода часов необходимо культивировать клетки в течение 4-5 сут. Поэтому тестирова-

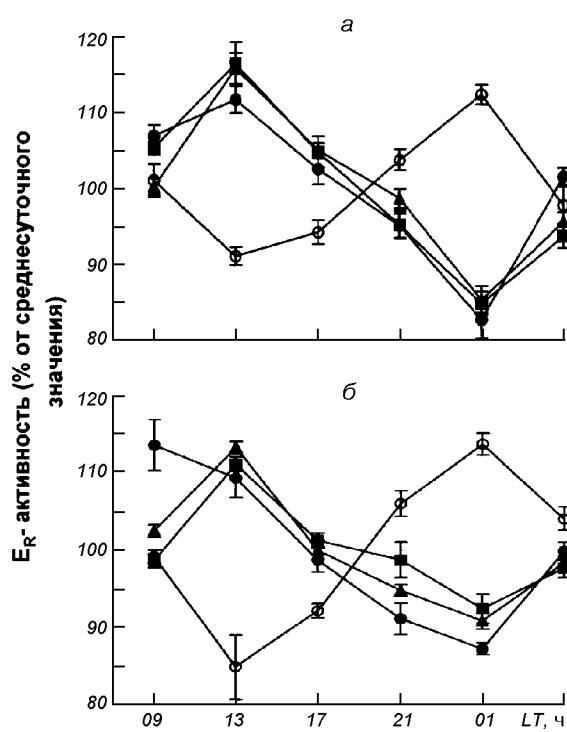


Рис. 2. Фотокоррекция циркадианных ритмов Е-розеткообразующей активности лимфоцитов при периодическом освещении клеточных культур красным (а) и синим (б) светом (шестые сутки культивирования). Представлены данные, полученные на четырех донорах в четырех независимых экспериментах

ние циркадианных ритмов проводили после 5 сут культивирования.

Культивирование клеток при освещении красным или синим светом в дневное время суток, как и содержание их в постоянной темноте, существенно не изменяло характер исходного циркадианного ритма, т.е. того, каким он был в день взятия крови и выделения клеток. Напротив, освещение клеток в ночное время приводило к полной инверсии ритма со сдвигом пика розеткообразования с приблизительно полудня (13 ч) на полночь (1 ч) (рис. 2).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что циркадианные часы, содержащиеся в лимфоцитах крови человека, являются автономными (самоподдерживающимися) и светочувствительными.

Исходя из описанных результатов, представляло интерес выяснить, будут ли циркадианные часы лимфоцитов человека реагировать на условия невесомости при культивировании их *in vitro*. На данном (первом) этапе исследования были проведены эксперименты по трехсуточному культивированию в условиях измененной гравитации (в горизонталь-

ном клиностате, 2—4 об./мин) лимфоцитов, выделенных из крови доноров. Контрольные клетки культивировались тот же срок в условиях нормальной гравитации.

Опыты показали, что измененная гравитация оказывала значительное влияние на жизнеспособность лимфоцитов в культуре. Так, если через сутки культивирования в клиностате показатели гибели клеток не отличаются от контрольной культуры и составляют около 5 %, то уже через двое суток клиностатирования жизнеспособной остается лишь половина клеточной популяции, а через трое суток все лимфоциты, культивировавшиеся в клиностате, погибают.

Полученные в этих экспериментах результаты подтверждают данные других исследований о том, что в условиях измененной гравитации нарушается нормальная активность лимфоцитарных клеток, теряется их способность отвечать на воздействие митогенов, значительно усиливаются процессы апоптоза (программированной смерти) в культивируемых лимфоцитах [7, 10, 14, 23]. Одной из причин гибели лимфоцитов при клиностатировании может являться перераспределение в клетке субклеточных структур (в первую очередь обладающих высокой удельной плотностью), а также вызванные этим нарушения в морфофункциональном состоянии цитоскелета.

В ходе дальнейших исследований влияния измененной гравитации на лимфоциты в культуре будет выяснено, как отражается на жизнеспособности и циркадианной ритмике клеток кратковременное клиностатирование (например, в течение суток) с последующим культивированием их в условиях нормальной гравитации.

- Гамалея Н. Ф., Шишко Е. Д. Первые данные о наличии фоточувствительных биологических часов в лимфоцитах крови человека // Доклады НАН Украины.—2001.—№ 6.—С. 181—185.
- Гамалея Н. Ф., Шишко Е. Д., Косинская Н. П., Черный А. П. Суточные ритмы Е-розеткообразующей способности лимфоцитов человека // Иммунология.—1990.—№ 1.—С. 211—213.
- Гамалея Н. Ф., Шишко Е. Д., Яниш Ю. В. Механизм лазерной биостимуляции — факты и гипотезы // Изв. АН СССР. Сер. физич.—1986.—№ 3.—С. 1027—1032.
- Balsalobre A., Damiola F., Schibler U. A serum shock induced circadian gene expression in mammalian tissue culture cells // Cell.—1998.—93.—P. 929—937.
- Brown S. A., Schibler U. The ins and outs of circadian timekeeping // Curr. Opin. Genet. Dev.—1999.—9.—P. 588—594.
- Cogoli A. The effect of hypogravity and hypergravity on cells of the immune system // J. Leukoc. Biol.—1993.—54 (3).—P. 259—268.
- Cogoli A., Cogoli-Greuter M. Activation and proliferation of lymphocytes and other mammalian cells in microgravity // Adv.

- Space Biol. Med.—1997.—6.—P. 33—79.
- Cogoli A., Tschopp A., Fuchs-Bislin P. Cell sensitivity to gravity // Science.—1984.—225, N 4658.—P. 228—230.
 - Cogoli-Greuter M., Meloni M. A., Sciola L., et al. Movement and interactions of leukocytes in microgravity // J. Biotechnol.—1996.—47 (2-3).—P. 279—287.
 - Cooper D., Pride M. W., Brown E. I., et al. Suppression of antigen-specific lymphocyte activation in modeled microgravity // In Vitro Cell. Dev. Biol. Animal.—2001.—37 (2).—P. 63—65.
 - Fuller C. A., Hoban-Higgins T. M., Klimovitsky V. Y., et al. Primate circadian rhythms during spaceflight: results from Cosmos 2044 and 2229 // J. Appl. Physiol.—1996.—81 (1).—P. 188—193.
 - Giebultowicz J. M. Molecular mechanism and cellular distribution of insect circadian clocks // Annu. Rev. Entomol.—2000.—45.—P. 769—793.
 - Gundel A., Polyakov V. V., Zulley J. The alteration of human sleep and circadian rhythms during spaceflight // J. Sleep Res.—1997.—6 (1).—P. 1—8.
 - Hashemi B. B., Penkala J. E., Vens C., et al. T cell activation responses are differentially regulated during clinorotation and in space flight // FASEB J.—1999.—13.—P. 2071—2082.
 - Immunologische Arbeitsmethoden (ed. by H. Friemel). — Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1984.
 - Monk T. H., Bussye D. J., Billy B. D., et al. Sleep and circadian rhythms in four orbiting astronauts // J. Biol. Rhythms.—1998.—13 (3).—P. 188—201.
 - Pellis N. R., Goodwin T. J., Risin D., et al. Changes in gravity inhibit lymphocyte locomotion through type I collagen // In Vitro Cell. Dev. Biol. Anim.—1997.—33 (5).—P. 398—405.
 - Pennisi E. Multiple clocks keep time in fruit fly tissues // Science.—1997.—278.—P. 1560—1561.
 - Plautz J. D., Kaneko M., Hall J. C., et al. Independent photoreceptive circadian clocks throughout Drosophila // Science.—1997.—278.—P. 1632—1635.
 - Robinson E. L., Fuller C. A. Gravity and thermoregulation: metabolic changes and circadian rhythms // Pflugers Arch.—2000.—441 (2-3 Suppl).—P. 32—38.
 - Stampi C. Sleep and circadian rhythm in space // J. Clin. Pharmacol.—1994.—34 (5).—P. 518—534.
 - Vernikos J. Human physiology in space // Bioessays.—1996.—18 (12).—P. 1029—1037.
 - Walther I., Pippa P., Meloni M. A., et al. Simulated microgravity inhibits the genetic expression of interleukin-2 and its receptor in mitogen-activated T lymphocytes // FEBS Lett.—1998.—436 (1).—P. 115—118.
 - Whitmore D., Foulkes N. S., Sassone-Corsi P. Light acts directly on organs and cells in culture to set the vertebrate circadian clock // Nature.—2000.—404.—P. 87—91.

A CELL MODEL FOR THE STUDY OF ALTERED GRAVITATION EFFECTS ON HUMAN CIRCADIAN RHYTHMICITY

N. F. Gamaleia, E. D. Shishko, O. B. Horobets

One of the most important problems associated with manned space flights is the alteration of normal temporal physiology in an astronaut's organism. This necessitates the investigation of space-environment effects on human chronobiological architectonics as a basis for elaboration of countermeasure strategies. We developed a new cell model. It is established that human blood lymphocytes contain a photosensitive circadian clock and the culture of those cells may be used for the study of the influence of space factors (especially, microgravity) on circadian rhythms in human organism.

© Н. І. Адамчук-Чала

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Україна, Київ

ВПЛИВ КЛИНОСТАТУВАННЯ НА ТРАНСФОРМАЦІЮ ЕТІОПЛАСТИВ В ХЛОРОПЛАСТИ ПАРОСТКІВ ЯЧМЕНЮ

Досліджувався вплив клиностатування на структурні показники пластид зеленіючих проростків ячменю сорту «Зоряний». Порівняльний аналіз динамічних ультраструктурних змін пластид контрольних і клиностатованих зеленіючих проростків показав такі відхилення у метаморфозі хлоропластів: зменшення об'єму пластид у варіанті 15 хв освітлення, зменшення площини проламелярного тіла у варіанті 1 год освітлення, скорочення довжини ламел, розвинутих із нього у варіантах 1 і 3 год освітлення. В умовах контролю після трьох годин освітлення формувалися етіохлоропласти, після 6 год — хлоропласти. При клиностатуванні і освітленні 6 год розвивались лише етіохлоропласти. Оговорюються можливі механізми затримки трансформації етіопластів у хлоропласти в умовах клиностатування.

ВСТУП

Завдяки проведенню біокосмічних експериментів протягом останніх десятиліть переконливо доведено, що рослинні клітини різного типу є гравічувливими. Дослідження гравічувливості клітин мезофілу виконували або на етіольованих паростках [4], або на паростках, що розвивалися в умовах освітлення [1, 2]. В наших попередніх дослідженнях [5] було проведено вивчення впливу клиностатування на морфологічні характеристики та синтез головних пігментів листків ячменю протягом першої доби зеленіння. Проте відкритими залишилися питання — які структурні зміни пластид в процесі зеленіння викликає клиностатування і як воно впливає на формування фотосинтетичних мембрани.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Об'єктами експерименту були обрані рослини ярого ячменю сорту «Зоряний». Паростки вирощували в горщиках на базальтовому волокні при температурі 20—24 °C у стаціонарному вертикальному контролі та при повільному горизонтальному клиностатуванні 2 об./хв. Щодоби здійснювався одноразовий полив паростків 9 % розчином екстракту вермістиму (1 мл на паросток). Паростки зростали 5 діб у темряві з наступним освітленням 0.25, 0.5, 1, 3 та 6 год люмінесцентними лампами інтенсивністю розсіянного світла 6 тис. люкс, як було рекомендовано в роботі [8]. Показники субструктурної організації хлоропластів клітин мезофілу першого

ряду від адаксіальної епідерми визначали за електронограмами, відзнятими на електронному трансмісійному мікроскопі JEM 1200 EX із застосуванням лінійних (за допомогою масштабної лінійки та курвиметра) морфометричних вимірювачів і обчислення параметрів, об'єм пластид та парціальний об'єм місць локалізації хлоропластної ДНК визначали у програмі Image Tool.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОБГОВОРЕННЯ

Умови клиностатування викликали дезорієнтацію паростків ячменю протягом їхнього розвитку із насіння на приладі. Подібний ефект спостерігався в наших дослідженнях *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. [1, 2]. Причини дезорієнтації паростків в умовах зміни сили тяжіння розглянуті в роботах [7, 10].

Процес зеленіння паростків ячменю відбувався відповідно до схеми онтогенезу хлоропластів Фрей-Вісслінга і Мюлеталера [6]. Ультраструктурна організація клітин адаксіального епідермального шару та субепідермального шару мезофілу була типовою для клітин мезофілу етіольованих паростків [9]. Пропластиди субепідермальних клітин мали ультраструктурну організацію, характерну для цього виду пластид, що цілком узгоджується з моделлю Вейера і Брауна [11]. Згідно з цією моделлю проламелярне тіло пластид етиолянтів являє собою трубчасто-гратову структуру, модулем якої є шестикутник. Під дією світла з проламелярного тіла розвиваються ламели, що диференціюються на ламели строми і ламели гран. Параметри пластид

після 15 хв освітлення представлени в табл. 1. На третю годину зеленіння об'єм контрольних етиохлоропластів змінювався з 23.42 ± 2.26 мкм³ до 19.88 ± 1.52 мкм³ при клиностатуванні. Хлоропласти виявлялися лише на шосту годину зеленіння, і тільки у контрольних паростків, що свідчило про затримку процесу зеленіння в умовах зміни сили тяжіння. Розміри хлоропластів контрольних паростків були 45.35 ± 1.60 мкм³, пластид при клиностатуванні — 39.24 ± 1.58 мкм³.

Світловий стимул є головним фактором трансформації етіопластів в хлоропласти, що активує розвиток ламел — попередників фотомембрани. На поперечному зрізі етіопластів та етіохлоропластів (рис. 1) виявлялися «паракристалічні» проламелярні тіла і система паралельних ламел, що розвивалися з них. Строма пластид містила електроннопрозорі ділянки локалізації пластидної ДНК та канали периферійного пластидного ретикулу. Дані зміни параметрів субструктурних елементів пластид на різних етапах процесу зеленіння представлені в табл. 2. Параметри ультраструктурної організації паростків після 15- та 30-хв освітлення характеризувалися відсутністю достовірної різниці між варіантами контролю і досліду.

Процес розвитку ламел в умовах кліностатування гальмувався. Строма етиохлоропластів протягом зеленіння характеризувалася неоднорідністю. Вирізнялися електроннопрозорі місця локалізації пластидної ДНК. Щільність популяції рибосом в стромі досліджуваних пластид коливалася від 15—30 одиниць на 100 нм² та зростала у процесі

Таблиця 1. Параметри етіопластів субепідермальних клітин мезофіту етіользованих паростків ячменю

Параметр	Контроль	Клиностатування
Повздовжня вісь, мкм	3.84 ± 0.93	3.66 ± 0.83
Поперечна вісь, мкм	2.38 ± 0.12	$2.06 \pm 0.11^*$
Об'єм, мкм ³	19.53 ± 1.45	17.96 ± 1.43

$p \leq 0.05$

зеленіння до 30—55 одиниць на 100 нм². Також для пластид клиностатованих зеленіючих паростків характерне збільшення каналців периферійного пластидного ретикулу, що утворювались із інвагнацій внутрішньої мембрани оболонки пластиди.

Таким чином, впродовж зеленіння паростків при клиностатуванні параметри пластид зменшувались (табл. 1) за рахунок скорочення поперечної осі пластид. Відповідно зменшувався і їхній об'єм. Цей ефект скоріш за все виникає ще під час ділення пропластид, проте спосіб реплікації етіопластів досі залишається мало вивченим. Етіопласти зеленіючих паростків містять проламелярне тіло у вигляді впорядкованого «пара кристалічного» центру каналів, що після належної світлової стимуляції змінюють свою орієнтацію та перетворюються у паралельні ламели. Ці внутрішні мембрани етіопластів і етіохлоропластів замість хлорофілу містятьprotoхлорофіл (жовтий попередник хлорофілу) [3] та моногалактозидіацилгліуерол (МГДГ) [8]. Автори обговорюють залежність функціонування мономерної форми світлозбиральних комплексів другої фотосистеми від вмісту МГДГ та звертають особливу увагу на значення чіткої білок-білкової та білок-ліпідної взаємодії в нативних тилакоїдах в перші фази зеленіння паростків ячменю. Вони ідентифікували дві родини білків ранньої світлової індукції мол. масою в 13—14 та 17—19 kDa, що беруть участь у трансформації етіопластів в хлоропласти, та є неспецифічно чутливими до зовнішнього впливу.

Аналізуючи результати наших дослідів, можна відмітити, що на рівні субструктурної організації пластид вплив чинника позначився на ступені розвитку проламелярних тіл, ламел та периферійного пластидного ретикулу (табл. 2). Оцінюючи динаміку цих змін у пластидах зеленіючих контрольних паростків ячменю, можна визначити такі закономірності: площа проламелярних тіл вірогідно зменшувалася (достовірність на першу годину зеленіння), на третю годину освітлення площа проламелярних тіл різко зменшувалася у контролі. Довжина ламел впродовж зеленіння повільно зростала

Таблиця 2. Параметри елементів субструктурної організації пластид зеленіючих паростків ячменю

Показник	15 хв		30 хв		1 год		3 год	
	К	Кл	К	Кл	К	Кл	К	Кл
Площа проламелярного тіла, мкм ²	0.76 ± 0.02	0.68 ± 0.05	0.79 ± 0.03	0.66 ± 0.09	0.75 ± 0.08	0.50 ± 0.03	0.37 ± 0.05	0.53 ± 0.08
Довжина ламел, мкм	—	—	1.37 ± 0.09	1.25 ± 0.08	2.69 ± 0.04	1.29 ± 0.07	3.87 ± 0.11	1.63 ± 0.07
Кількість каналів периферійного пластидного ретикулу на зрізі пластиди	2.76 ± 0.23	3.43 ± 1.04	5.65 ± 0.03	6.21 ± 1.04	2.57 ± 0.39	8.04 ± 1.17	1.21 ± 0.96	9.63 ± 2.98

$p \leq 0.05$; К — контроль, Кл — клиностатування

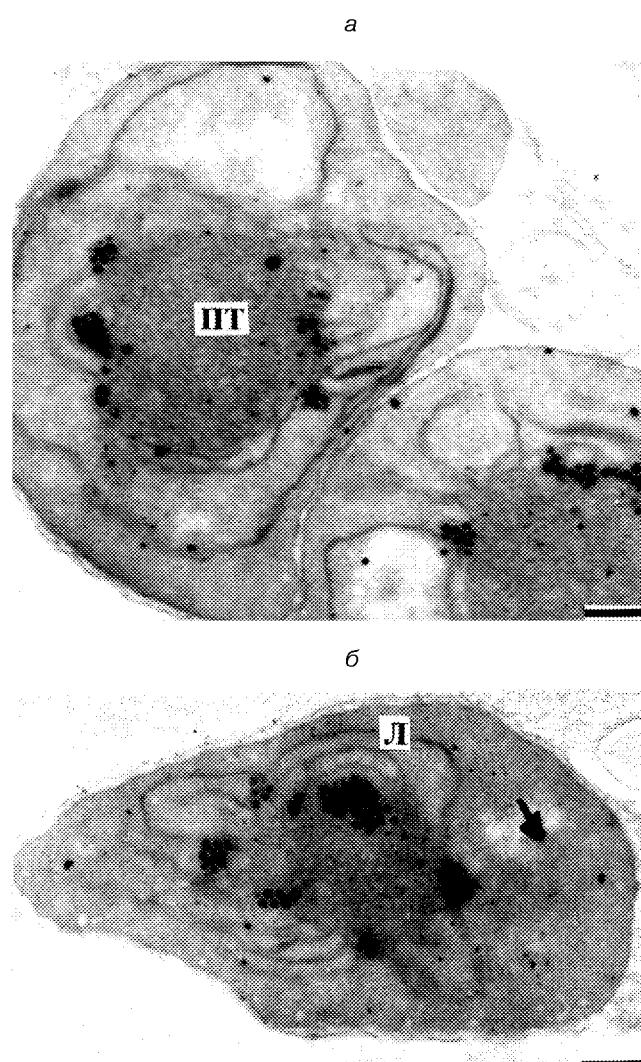


Рис. 1. Етіопласти субепідермальної клітини мезофілу 5-добових контрольних паростків ячменю після першої години зеленіння: а — контроль, б — клиностатування, ПТ — протоламелярне тіло, Л — ламели, стрілкою вказане електроннопрозоре місце локалізації пластидної ДНК, 100 нм

і була значно меншою від контрольного значення. На зрізах пластид першої години зеленіння клиностатованих паростків канали периферійного пластидного ретикулуму спостерігалися частіше.

Пластиди варіантів шостої години зеленіння не підлягають порівнянню через значну якісну гетерогенність популяції пластид контрольного і клиностатованого варіантів (рис. 2). Система фотомембрани, що диференціється на тилакоїди гран і тила-коїди строми, формувалася лише у хлоропластів контролю. В клітинах клиностатованих зеленіючих паростків розвивалися лише етіохлоропласти, фото-

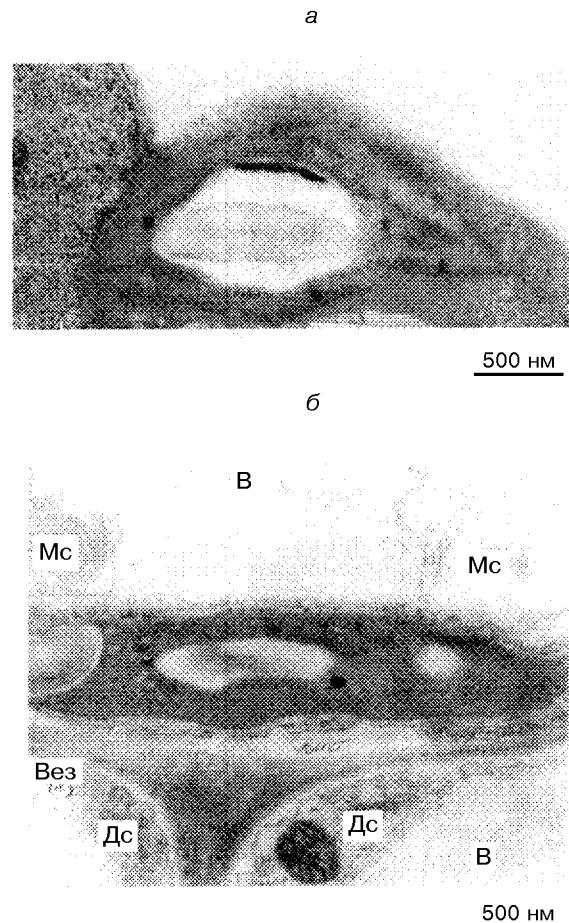


Рис. 2. Пластиди клітини мезофілу 5-добових паростків ячменю після шести годин зеленіння: а — контроль, б — клиностатування, В — вакуоль, Mc — мезосоми, Дс — диктіосоми, Вез — везикули

мембрани яких були представлені частково розширеними ламелами (рис. 2). Цей ефект вказує на те, що клиностатування затримує процес трансформації пластид у хлоропласті, які спостерігалися тільки у популяції пластид контрольного варіанту.

Висновки

Порівняльний аналіз динамічних ультраструктурних змін пластид контрольних і клиностатованих зеленіючих паростків показав такі відхилення морфогенезу хлоропластів: зменшення об'єму пластид у варіанті 15 хв освітлення, зменшення площин проламелярного тіла у варіанті 1 год освітлення, скорочення довжини ламел, що розвиваються з нього, у варіантах 1 і 3 год освітлення. В умовах

контролю після трьох годин освітлення формувалися етіопласти, після шести годин — хлоропласти. При клиностатуванні освітленні 6 годин розвивалися лише етіохлоропласти. Можливі механізми затримки формування хлоропластів із етіопластів-етіохлоропластів за умов клиностатування: на рівні пластиди — гальмування розвитку системи ламел; на рівні фотомембран — зміна співвідношення високомолекулярних і відносно низькомолекулярних поліпептидів, синтез яких закодований в геномі пластиди.

1. Адамчук Н. І. Будова сім'ядольного листка *Arabidopsis thaliana* cv *Columbia* в умовах клиностатування // Укр. ботанічний журн.—1995.—52, № 5.—С. 605—610.
2. Адамчук Н. І. Влияние клиностатирования на фотосинтетический аппарат семисуточных проростков *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. // Космична наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 44—47.
3. Гелстон А., Девіс И., Сеттер Р. Жизнь зеленого растения. — М.: Мир, 1983.—552 с.
4. Недуха Е. М., Кордюм Е. Л., Филипенко В. Н., Чучкин Ж. А. Влияние микрогравитации на клеточные оболочки надземных органов проростков *Impatiens balsamina L.* — М., 1991.—22 с.—(Рукопись деп. в ВИНИТИ; № 137-В).
5. Сиваш О. О., Адамчук Н. І., Повхан М. Ф., та ін. Вплив мікргравітації на ріст та синтез пігментів етіользованих паростків ячменю // Наук. вісник НАУ.—2000.—32.—С. 165—170.
6. Фрей-Виссинг А., Мюлеталер К. Ультраструктура растительной клетки. — М.: Мир, 1968.—408 с.
7. Hoson T., Soga K., Mori R., et al. Morphogenesis of rice and *arabidopsis* seedlings in space // J. Plant Res.—1999.—112.—P. 477—486.
8. Kota Z., Hovath L. I., Droppa M., et al. Protein assembly and heat stability in developing thylakoid membranes during greening // PNAS.—2002.—99, N 19.—P. 12149—12154.
9. Kutschera U. The biophysical basis of cell elongation and organ maturation in coleoptiles of rye seedlings: implications for shoot development // Plant Biology.—2004.—6.—P. 158—164.
10. Ueda J., Miyamoto K., Yuda T. Growth and development, and auxin polar transport in higher plant under microgravity conditions in space: BRIC-AUX on STS-95 Space Experiment // J. Plant Res.—1999.—112.—P. 487—492.
11. Weier T. E., Brown D. L. Formation of the prolamellar body in 8-day, dark-grown seedlings // Amer. J. Bot.—1970.—57, N 3.—P. 267.

CLINOROTATION EFFECT ON THE TRANSFORMATION FROM ETYOPLASTS TO CHLOROPLASTS FOR BARLEY SEEDLINGS

N. I. Adamchuk-Chala

The clinorotation effect on the plastide substructure characteristics of greening barley seedlings of the variety "Zorianyi" is investigated. A comparison analysis of dynamic changes in clinorotated greening seedlings and in control ones showed the following: the volume of plastides decreased, the developing of prolamellar body and shorting of lamellae length under greening during 1 h and 3 h take place. Chloroplasts were formed only in the cells of the control variant on greening for 6 h. Possible mechanisms of the delay of transformation from etyoplasts and etyochloroplasts to chloroplasts are discussed.

УДК 577.218:582.683.2

© О. А. Артеменко, А. Ф. Попова

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Україна, Київ

ЭКСПРЕССИЯ δ-ЦИКЛИНОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ ЗАРОДЫШЕЙ *BRASSICA RAPA L.* В УСЛОВИЯХ КЛИНОСТАТИРОВАНИЯ

Представлено результати порівняльного вивчення ембріогенезу та експресії генів δ -циклінів у рослин *Brassica rapa* L., які росли в умовах повільного горизонтального клиностатування та лабораторного контролю. Виявлено відставання експресії генів $\delta 1$ -цикліну на ранніх етапах розвитку зародків, сформованих за умов клиностатування, порівняно із лабораторним контролем. Показаний подібний рівень експресії генів $\delta 3$ -цикліну на всіх етапах розвитку зародків (протягом 1-9 діб) в обох варіантах. Деяке запізнення темпів розвитку зародків *Brassica rapa* (1-2 доби) в умовах клиностатування у порівнянні з лабораторним контролем може бути результатом зниження рівня та певного відставання експресії генів $\delta 1$ -цикліну, що виявляється на ранніх етапах формування зародків.

Введение. Условия микрогравитации в определенной мере влияют на развитие зародышей *Brassica rapa*, о чем свидетельствуют результаты космических экспериментов [8, 10]. Сформированные в условиях космического полета зародыши *Brassica*

за составом накопления запасных питательных веществ являются физиологически более молодыми по сравнению с таковыми наземного контроля.

Важность изучения особенностей развития зародышей и их дифференцирования в условиях микро-

гравитации обусловлена необходимостью беспрерывного культивирования высших растений в контролируемых экологических системах жизнеобеспечения, функционирование которых планируется на борту орбитальных станций с увеличением продолжительности космических полетов. Причем именно высшие растения рассматриваются как основные компоненты таких систем благодаря возможности использования их в качестве витаминных и пищевых добавок для космонавтов, а также как регенераторов кислорода в закрытых объемах космических аппаратов.

Полученные в условиях космического полета семена высших однолетних растений по ряду биометрических характеристик отличались от контрольных, в частности размером, весом, количеством и составом запасных веществ, а также лигнина [1, 3, 9], что может быть результатом отклонений в процессе эмбриогенеза. Меньший размер зародышей *Brassica rapa*, сформированных в условиях микрогравитации, по мнению ряда исследователей [9], объясняется уменьшением количества клеток в семядолях, возможно, вследствие ингибирования митоза ядер в этих клетках. Процесс формирования семян изучался также в модельных экспериментах с применением клиностатирования [4], однако эмбриогенез не исследовался, и данных о развитии зародышей в этих условиях нет.

Как известно, циклин-зависимые киназы и циклины являются принципиальными регуляторами эукариотического клеточного цикла. Специфическими для растений являются δ -циклины трех типов ($\delta 1$, $\delta 2$ и $\delta 3$), выделенные из *Arabidopsis thaliana* (L.). Циклин $\delta 1$ отвечает за события, которые происходят в клетке до ее выхода из состояния покоя, $\delta 2$ — за события вступления и выхода из состояния покоя (G0-стадия), $\delta 3$ — за события, которые происходят в клетке после ее выхода из состояния покоя и перехода в фазу синтеза [11]. Поэтому исследования уровня экспрессии генов δ -циклинов, отвечающих за события пресинтетической фазы цикла, важны для выявления эффектов клиностатирования на транскрипционную активность клеток. Здесь мы исследовали особенности протекания раннего эмбриогенеза растений *Brassica rapa* L. и экспрессию $\delta 1$ - и $\delta 3$ -циклинов.

Как свидетельствует опыт экспериментов в условиях космического полета, использование комплекса аналитических методов анализа, эквивалентных запланированным исследованием, как и применение темпоральной фиксации растительного материала, в условиях микрогравитации существенным образом ограничены. Поэтому в своих исследованиях мы использовали клиностатирование, позво-

ляющее воссоздавать эффекты микрогравитации в лабораторных условиях (хотя при этом нельзя избавиться от скалярной составляющей).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использовали растения *Brassica rapa* L. (форма Astroplants), с которыми выполнено несколько экспериментов на борту космических аппаратов. Проклюнувшиеся семена помещали в культиваторы, установленные на медленных горизонтальных клиностатах (со скоростью вращения 2 об/мин). Растения выращивали при освещении 220 мкмоль/м²/с. Искусственное опыление цветков проводили специальным приспособлением, приготовленным из брюшка пчелы. Опыленные цветки маркировали цветными нитками, что позволяло четко идентифицировать возраст сформированных зародышей.

Для светооптического исследования зародыши и семяпочки фиксировали смесью 2.5 % раствора глютарового альдегида и 1 % параформальдегида на 0.1 % фосфатном буфере с pH-7.0 с последующим заключением материала в смесь эпона с аралдитом согласно стандартной методике. Для морфологического изучения зародышей срезы окрашивали раствором толуидинового синего, а также проводили реакцию ШИК для выявления полисахаридов [3].

Для изучения экспрессии циклинов осуществляли трансформацию клеток культуры *Esherichia coli* плазмидами pJG8, pBSD2 та pRS1 (производными плазмидами pBluescript Kan⁺), содержащими соответственно циклины $\delta 1$ и $\delta 3$ с целью получения необходимого количества ДНК-зондов. Для поддержания жизнеспособности плазмид pBluescript SK+ культуру *E.coli* DH5 α периодически обновляли и хранили при температуре +4 °C. В качестве среды использовали L-агар.

Фрагменты ДНК, содержащие указанные гены циклинов, выделяли с помощью эндонуклеаз рестрикции Not I, Xba I, Hind III, EcoRI, Bgl II и BamHI и разделяли с помощью стандартного гель-электрофореза в трис-ацетатном буфере (ТАЕ). Зонды метили нерадиоактивной меткой дигоксигенином. Как маркер использовали ДНК фага δ , расщепленную по Hind III [2]. Подобраны и адаптированы методы для выделения РНК и условия для проведения последующей гибридизации согласно [6].

Для определения уровня экспрессии генов δ -циклинов выделяли суммарную РНК из зародышей *Brassica rapa* 3-, 6- и 9-суточного возраста клиностатного и контрольного вариантов. С помощью метода Нозерн-блоттинга выделенную РНК пере-

носили на нейлоновые мембранны и проводили гибридизацию на фильтрах, Диг-меченых ДНК-зондами циклинов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ сформированных зародышей на ранних стадиях их развития в условиях клиностатирования и в лабораторном контроле показал значительную их подобность. Так, 2-3-суточные зародыши в обоих вариантах имели шаровидную форму и обычно состояли из нитеподобного подвеска, сформированного семью клетками, и собственно зародыша. На поперечных срезах, проходящих через центральную часть зародышей, последнее, как правило, состояли из трех рядов клеток. Эпидермальный слой содержал до 13—15 клеток, субэпидермальный — до 9—10 клеток и внутренний — до 3—5 клеток.

В 3—5-суточных зародышах отмечали дифференциацию протодермы, а также начало формирования семядолей в виде небольших бугорков (рисунок *a*). В 9-суточных зародышах семядоли достигали значительной длины, однако наблюдалась их четкая симметрия, т. е. изгибов семядолей и зародышевого корня в этот период еще не происходило.

В условиях клиностатирования на ранних стадиях формирования зародышей довольно часто отмечали отставание в темпах их развития, обычно на

1-2 сут. Так, если в контрольных зародышах уже появлялись бугорки будущих семядолей, то зародыши клиностатного варианта, как правило, еще имели шаровидную форму (рисунок).

Исследование экспрессии δ -циклинов на разных этапах развития зародышей лабораторного контроля показало, что $\delta 1$ -циклин экспрессируется только на ранних стадиях (в 3-6-суточных зародышах). На более поздних стадиях их формирования (9-суточные зародыши) экспрессии генов $\delta 1$ -циклина уже не было. Экспрессию генов $\delta 1$ -циклина в меристематических клетках молодых листьев *Brassica*, использованных нами как модель для выявления экспрессии δ -циклинов в тканях с активной пролиферацией, наблюдали во все указанные сроки эксперимента.

В клиностатном варианте экспрессия $\delta 1$ -циклина отмечалась с опозданием на 2-3 сут, т. е. обычно на шестые сутки развития зародышей, причем ее уровень был значительно ниже контрольного варианта. На 9-е сутки экспрессия генов $\delta 1$ -циклина в клиностатном варианте слабо выявлялась, а в контроле в этот период ее совсем не было.

Экспрессия генов $\delta 3$ -циклина в зародышах в условиях клиностатирования и в лабораторном контроле всех исследуемых возрастов (1—9 сут) была приблизительно на одном уровне.

Данные о некотором отставании экспрессии генов $\delta 1$ -циклина на ранних этапах развития зародышей

(3–6-суточных) в клиностатном варианте коррелируют с результатами об определенной задержке по сравнению с контролем темпов развития зародышей, о чем свидетельствуют цитоэмбриологические исследования. Полученные нами результаты о более поздних сроках экспрессии генов $\delta 1$ -циклина в зародышах, сформированных в условиях клиностатирования, совпадают с известными литературными данными о том, что экспрессия $\delta 1$ -циклина наблюдается только в начале клеточного цикла (фазы G1-G0) [11]. Отставание экспрессии генов $\delta 1$ -циклина в условиях клиностатирования по сравнению с лабораторным контролем, возможно, связано с ингибированием транскрипционной активности этих генов, что может приводить к блокированию синтеза некоторых белков клеточного цикла. Подобный характер изменений экспрессии генов ряда белков, в частности ингибирование экспрессии генов двух белков цитоскелета, отмечали в условиях клиностатирования [12], а также снижение экспрессии ряда ферментов углеводного обмена в условиях космического полета [7].

Таким образом, некоторое запаздывание темпов развития зародышей *Brassica rapa* в условиях клиностатирования по сравнению с лабораторным контролем, возможно, является следствием отставания экспрессии генов $\delta 1$ -циклина на ранних этапах развития и некоторого снижения уровня их транскрипционной активности.

ВЫВОДЫ

Формирование зародышей на ранних стадиях развития в условиях клиностатирования и в лабораторном контроле осуществляется в основном одинаково, хотя выявлено незначительное отставание в темпах их развития в клиностатном варианте.

Отмечено отставание экспрессии генов $\delta 1$ -циклина на ранних этапах развития зародышей, сформированных в условиях клиностатирования по сравнению с лабораторным контролем, тогда как экспрессия генов $\delta 3$ -циклина наблюдается в зародышах во все исследуемые сроки (1–9 сут) в обеих вариантах.

Некоторое запаздывание в темпах развития зародышей *Brassica rapa* в условиях клиностатирования по сравнению с лабораторным контролем, возможно, является результатом отставания экспрессии генов $\delta 1$ -циклина, что выявляется на ранних эта-

пах формирования зародышей, и некоторого снижения уровня их транскрипционной активности.

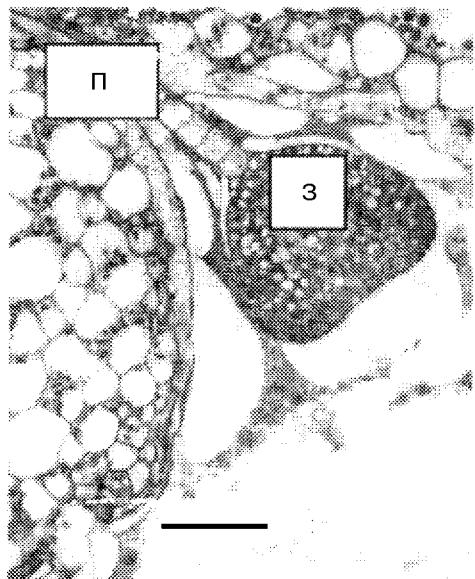
- Левинских М. А., Сычев В. Н., Дерендяева Т. А. и др. Анализ влияния космических факторов на рост и развитие суперкарликовой пшеницы в оранжере «Свет» // Авиакосмич. и эколог. мед.—1999.—33.—С. 30—37.
- Маниатис Т., Фрич Э., Сэмбрук Д. Молекулярное клонирование. — М.: Мир, 1984.—479 с.
- Меркис Ф. И., Лауринавичюс Р. С. Полный цикл индивидуального развития растений *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. на борту орбитальной станции Салют-7 // ДАН СССР.—1983.—271.—С. 509—512.
- Меркис Ф. И., Лауринавичюс Р. С., Рупайнене О. Ю. и др. Рост и развитие растений в условиях, имитирующих невесомость // ДАН СССР.—1976.—226.—С. 978—981.
- Пашева З. П. Основы цитологии растений. — М.: Колос, 1980.—213 с.
- DIG Application Manual for filter hybridization / Ed. Roshe. — Manheim, German., 2002.—222 p.
- Hampp R., Martzivanou M., Mair R.-M., et al. Gravity effects on the *Arabidopsis transcriptome* // Abstr. of 24th Annual Internet. Gravit. Physiol. Meet., 4-9 May, 2003.—P. 68.
- Kuang A., Popova A., Xiao Y., Musgrave M. E. Pollination and embryo development in *Brassica rapa* L. in microgravity // Int. J. Plant Sci.—2000.—161 (2).—P. 203—211.
- Musgrave M. E., Kuang A., Xiao Yi., et al. Gravity-independence of seed-to-seed cycling // Planta.—2000.—210.—P. 400—406.
- Popova A., Musgrave M., Kuang A., Xiao Y., Reserve nutrient substance accumulation in *Brassica rapa* L. seeds in microgravity conditions (STS-87) // J. Gravitat. Physiol.—2002.—9, N 1.—P. 237—238.
- Soni R., Carmichael J. P., Shah Z. H., et al. A family of cyclin D homologs from plants differentially controlled by growth regulators and containing the conserved retinoblastoma protein interaction motif // The Plant Cell.—1995.—17.—P. 85—103.
- Zhang Shu, Wang Bing, Wu Yan-Hong, et al. Gene expression of paxillin and talin in osteoblasts during weightlessness simulation using clinostat // Abstr. of 24th Annual Internet. Gravit. Physiol. Meet., 4-9 May, 2003.—P. 68.

THE δ -CYCLIN EXPRESSION AT EARLY STAGES OF EMBRYOGENESIS OF *BRASSICA RAPA* L. UNDER CLINOROTATION

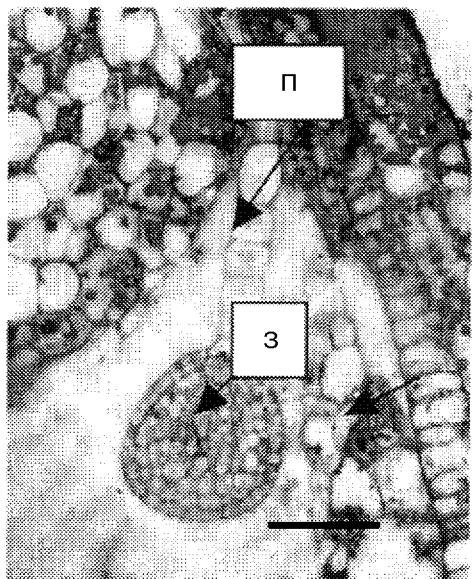
O. A. Artemenko, A. F. Popova

We present some results of comparison studying of *Brassica* embryo development and the δ -cyclin genes expression under slow horizontal clinorotation and in the laboratory control. Some backlog of the $\delta 1$ -cyclin genes expression at early stages of embryogenesis under clinorotation was revealed in comparison with the laboratory control. The similar level of the $\delta 3$ -cyclin expression at all stages of embryo formation (from one to nine days) in both variants is shown. Some delays in the rate of *Brassica rapa* embryo development under clinorotation in comparison with the laboratory control can be a result of decrease of a level and some backlog of the $\delta 1$ -cyclin expression at early stages of embryogenesis.

a



б



© О. И. Воловик¹, С. К. Сытник¹, Н. Н. Топчий²

¹Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

²Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Київ

ВЛИЯНИЕ ИМИТИРОВАННОЙ НЕВЕСОМОСТИ (КЛИНОСТАТИРОВАНИЯ) НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ (HORDEUM VULGARE L.)

З використанням ДДС-На-електрофорезу в ПААГ, а також спектрофотометричних і полянографічних методів проведено дослідження впливу імітованої мікрогравітації на організацію і функціонування фотосинтезуючих органел — хлоропластів, виділених із рослин ячменю. Показано, що в умовах клиностатування збільшується відносний вміст мономерних форм світлозбирального комплексу фотосистеми II (LHCII) за рахунок зменшення олігомерних форм цього комплексу, а також зменшується доля цілісного комплексу фотосистеми I (ФСI). Відносний вміст суми комплексів ФСI, а також комплексу фотосистеми II (ФСII) в клиностатованих рослинах також зменшується. Клиностатування викликало зменшення активності ФСI, ФСII і повного електронного транспорту, причому ступінь зменшення залежить від освітленості при вирощуванні рослин. Синтез АТФ, поєднаний з циклічним, псевдоциклічним та лінійним транспортом електронів, інгібувався в умовах імітованої невагомості.

Введение. В связи с освоением космического пространства и долгосрочными космическими экспедициями возникла проблема подбора растений и технологий их выращивания в системах жизнеобеспечения. Этую проблему невозможно решить без фундаментальных знаний о физиологии растительного организма в условиях измененной силы тяжести. Поскольку фотосинтез благодаря присущей ему уникальной функции регенерации воздуха и синтеза питательных веществ является одним из наиболее важных биологических процессов, его изучение при действии микрогравитации представляет значительный интерес как с теоретической, так и практической точки зрения.

Накопленные сведения о жизнеспособности высших растений, выращенных как в космических аппаратах, так и на Земле в условиях имитированной невесомости, свидетельствуют о том, что изменение напряженности гравитационного поля вызывает, наряду с изменениями роста и развития растений, существенную функциональную и структурную перестройку фотосинтетического аппарата. В литературе приводятся данные (иногда противоречивые) об изменении содержания пигментов, размеров и структуры хлоропластов, о везикуляции и дезориентации мембран [2]. Показано, что уменьшению массы выращенных на борту шаттла «Discovery» проростков пшеницы на 25 % соответствовало примерно такое же уменьшение как интенсивности фотосинтеза в условиях насыщения углекислым газом и насыщающей интенсивности света, так и скорости электронного транспорта в

реакции $\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ метилвиологен [6]. Снижение скоростей электронного транспорта на уровне фотосистем I и II наблюдалось у растений *Brassica Rapa*, выращенных на борту шаттла «Columbia» [7].

Цель нашей работы — изучение влияния имитированной невесомости на состояние хлоропластов, а именно, на скорости электронного транспорта и их пигмент-белковый состав.

Материалы и методы. Исследования проведены на растениях ячменя (*Hordeum vulgare L.*) выращенных в специально изготовленных пластиковых сосудах на базальтовом волокне с добавлением питательной смеси (разбавленного раствора вермистина) при температуре 23—25 °C и фотопериоде 16/18 до возраста 12—14 дней. Освещенность при выращивании растений — 140 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ (в отдельных экспериментах — 700 мкмоль·м⁻²·с⁻¹). Варианты: вертикальный контроль и горизонтальное клиностатирование при 4 об/мин.

Выделение хлоропластов и определение скоростей электронного транспорта проводились согласно описанным ранее методам [7]. Скорость фотофосфорилирования тестировалась согласно [1]. Хлорофилл определяли по методу [4].

Анализ пигмент-белковых комплексов тилакоидных мембран проводили с помощью ДДС-На -электрофореза в ПААГ по методу [3]. После электрофореза гели сканировали и анализировали с помощью программы TotalLab, 1.10.

Результаты и обсуждение. Зеленые электрофоретические зоны, соответствующие отдельным пигмент-белковым комплексам, обозначены соглас-

но номенклатуре [3]: CP1 — комплекс реакционного центра (РЦ) ФСI, лишенный собственного светособирающего комплекса LHCI; CPIa, CP2a, CP3a — комплексы РЦ ФСI, частично сохранившие LHCI; CPa — пигмент-белковый комплекс РЦ ФСII; LHCP¹ — олигомерная форма основного светособирающего комплекса LHCII; LHCP³ — мономерная форма LHCII; FChl — свободный хлорофилл.

Относительное содержание отдельных полос представлено в табл. 1. Суммы LHCP¹ и LHCP³ довольно близки по своему значению в контрольном и опытном вариантах (51.94 и 52.38 %). Однако соотношение между этими комплексами существенно отличается. У контрольных растений оно равняется 3.09, тогда как в клиностатированных — 1.38. Иными словами, в условиях клиностатирования происходит перераспределение форм светособирающего комплекса в пользу мономеров.

Другим заметным различием является изменение относительного содержания зон CP1a, CP2a и CP3a, соответствующих целостному комплексу реакционных центров ФСI, т. е. таких, которые сохранили (в большей или меньшей мере) в своем составе собственный светособирающий комплекс (LHCI). Из табл. 1 видно, что у контрольных растений наблюдается три соответствующих полосы, тогда как в клиностатированных — одна. Причем в последних отсутствуют наиболее высокомолекулярные (т. е. наиболее целостные) комплексы. Таким образом, как и в случае с LHCII (LHCP¹ + LHCP³), у клиностатированных растений в сравнении с контрольными наблюдается относительное уменьшение доли сложных комплексов ФСI. Кроме того, общее содержание комплексов, принадлежащих ФСI, у клиностатированных растений ниже на 25 %, а комплексов ФСII (CPa) — на 20 %.

Выращивание растений в условиях микрогравитации приводит, по-видимому, к таким изменениям в организации мембранных и пигмент-белковых комплексов, которые делают последних менее стабильными, т. е. менее стойкими к действию детергента. Об этом свидетельствует увеличение относительного содержания свободного хлорофилла в клиностатированном варианте. Кроме того, относительное увеличение мономерных форм LHCII может происходить также *in vivo* в стрессовых условиях, как это описано в работе [5].

Обнаруженные изменения в организации тилакоидных мембран сопровождались снижением скоростей фотохимических реакций.

Согласно данным, приведенным в табл. 2, скорость электронного транспорта через ФСII в хлоропластах клиностатированных растений ячменя в ре-

акции восстановления дихлорфенолиндофенола от воды ($H_2O \rightarrow DХФИФ$) снижалась (при насыщающей и при лимитирующей интенсивности возбуждающего света). Факт ингибиции повторился в полярографических исследованиях на тилакоидах растений, выращенных при двух уровнях освещенности — 700 и 140 $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Из табл. 3 видно, что скорость переноса электронов от H_2O к дихлорбензохинону ($H_2O \rightarrow DХБХ$, активность ФСII), снижалась у растений, которые выращивались как при высокой интенсивности света, так и при ее снижении (на 25 и 32 % соответственно). Аналогичная картина наблюдалась и в изменениях скоростей электронного транспорта на участке ФСI (реакция диаминодулен \rightarrow метилвиологен) и в полной электронтранспортной цепи ($H_2O \rightarrow$ метилвиологен), т. е. степень снижения активностей фотоприводов всех типов была приблизительно одинаковой, однако при выращивании в условиях пониженной освещенности изменения, вызванные клиностатированием, были более глубокими.

Эти результаты сходны с полученными нами ранее при сравнительном изучении активностей ФСI и ФСII в тилакоидах растений *Brassica rapa*, выращенных в наземных условиях и на борту КК «Columbia», 1997 г. Согласно данным, приведенным в работе [7], активность фотосистем, и особенно

Таблица 1. Распределение хлорофилла в хлорофилл-белковых комплексах тилакоидов

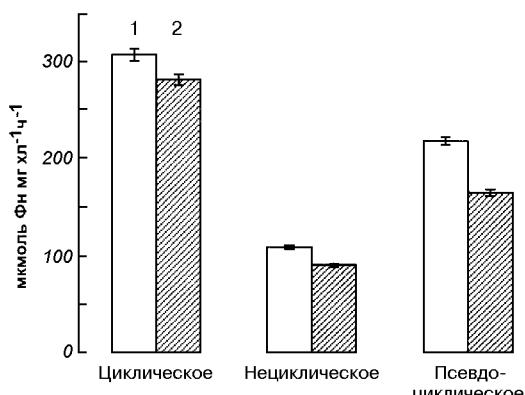
Хлорофилл-белковые комплексы	Доля от общего количества хлорофилла на геле, %		
	Контроль	Клиностатирование	% от контроля
CP3a	0.67±0.02	—	—
CP2a	2.49±0.32	—	—
CP1a	3.10±0.37	2.38±0.41	76.8
CP1	15.07±1.36	13.91±1.13	92.3
LHCP ¹	39.24±1.83	30.34±1.55	77.3
CPa	7.52±0.49	6.02±1.71	80.05
LHCP ³	12.70±1.61	22.04±1.63	173.5
FChl	19.00±1.84	25.30±1.33	133.1
LHCP ¹ + LHCP ³	51.94	52.38	100.8
LHCP ¹ /LHCP ³	3.09	1.38	44.7
CP3a + CP2a + CP1a + CP1	21.33	16.29	76.4

Таблица 2. Скорости электронного транспорта (фотоприводия $H_2O \rightarrow DХФИФ$) в тилакоидах ячменя, выращенного при 140 $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$, при насыщающем и лимитирующем возбуждающем свете ($\text{мкмоль} \cdot DХФИФ \text{ мг} \cdot \text{хл}^{-1} \text{ч}^{-1}$)

Варианты	Насыщающий свет	Лимитирующий свет
Контроль	246.5±11.6	157.7±7.2
Клиностатирование	167.3±9.0	119.4±2.8

Таблица 3. Активность электронного транспорта на уровне отдельных фотосистем и в полной цепи в тилакоидах растений ячменя

Фотореакция	Освещенность при выращивании, мкмоль·м ⁻² с ⁻¹			
	700		140	
	контроль	клиностатирование	контроль	клиностатирование
H ₂ O → ДХБХ (активность ФСII)	298.5±7.4 (100 %)	223.8±10.1 (75 %)	323.3±15.1 (100 %)	221.7±14.3 (68 %)
ДАД → МВ (активность ФСI)	416.8±16.2 (100 %)	317.9±4.6 (76 %)	378.4±11.6 (100 %)	258.6±10.7 (68 %)
H ₂ O → МВ (полный транспорт)	225.2±12.8 (100 %)	166.4±8.8 (74 %)	210.8±7.6 (100 %)	148.5±12.0 (70 %)



Влияние клиностатирования на скорость фотофосфорилирования

ФСI, в тилакоидах растений, выращенных в космических условиях на протяжении 16 сут, снижалась.

Нами исследованы также скорости образования АТФ в реакциях циклического, нециклического и псевдоциклического фотофосфорилирования, которые, как известно, увязываются с разными типами электронного транспорта, а именно: с циклическим переносом электронов вокруг ФСI, с линейным переносом от H₂O к НАДФ и с переносом электронов от H₂O через ФСII и ФСI на кислород соответственно. Как свидетельствуют приведенные на рисунке данные, клиностатирование вызывает угнетение скоростей образования АТФ, хотя и в разной мере для разных типов фотореакций.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать заключение, что клиностатирование приводит к изменению структурной организации фотосинтетических мембран на уровне их пигмент-белковых комплексов и к угнетению процессов световой стадии фотосинтеза. Кроме того, установлена зависимость функциональных изменений в тилакоидах от условий выращивания растений, а именно: при низком уровне освещенности снижение скоростей электронного транспорта было более глубоким. Можно полагать, что такая структурная

и функциональная реорганизация тилакоидных мембран является одной из причин обнаруженного нами снижения интенсивности фотосинтеза при действии микрогравитации.

1. Воловик О. И., Мануильская С. В. и др. Фосфорилирование белков светособирающего комплекса и электронный транспорт в фотосистемах I и II // Физиол. растений.—1986.—43, № 6.—С. 864—869.
2. Кордюм Е. Л., Сытник К. М. и др. Современные проблемы космической клеточной фитобиологии. — М.: Наука, 1994.—293 с.
3. Anderson J. M. P-700 content and polypeptide profile of chlorophyll-protein complexes of spinach and barley thylakoids // Biochim. Biophys. Acta.—1980.—591.—Р. 113—126.
4. Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in Beta vulgaris // Plant Physiology.—1949.—24.—Р. 1—15.
5. Garab G., Cseh Z., et al. Light induced trimer to monomer transition in the main light-harvesting antenna complex of plants: thermo-optic mechanism // Biochemistry.—2002.—41.—Р. 15121—15129.
6. Tripathy B. C., Brown C. S., et al. Growth and photosynthetic responses of wheat plants grown in space // Plant Physiology.—1996.—110.—Р. 801—806.
7. Volovik O. I., Kordyum E. L., Guikema J. A. Characteristics of photosynthetic apparatus under conditions of spaceflight // J. Gravit. Physiol.—1999.—6 (1).—Р. 127—128.

EFFECT OF THE SIMULATED WEIGHTLESSNESS (CLINOROTATION) ON A PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF BARLEY PLANTS (HORDEUM VULGARE L.)

O. I. Volovik, S. K. Sytnik, N. N. Topchiy

The effect of microgravitation (simulated by clinorotation) on the organization and functioning of chloroplasts, isolated from barley plants, is studied with the use SDS-electrophoresis, spectrophotometric and polarography methods. The relative content of monomeric forms of light harvesting complex of photosystem II (LHCII) increases at the expense of its oligomeric forms under clinorotation conditions. The decrease of the portion of the entire complex of photosystem I (PSI) as well as of the sum of the PSI complexes and the complex CPa (related to PSII) was observed in experimental variants. Clinorotation induced the decrease in PSI, PSII and full electron transport activity, and the extent of the reduction depended on the light intensity during plant growth. The ATP synthesis coupled with cyclic, noncyclic and linear electron transport was inhibited under the simulated microgravitation.

© Л. Е. Козеко

Інститут ботаніки ім. Н. Г. Холодного НАН України, Київ

АКТИН ПРОРОСТКОВ *BETA VULGARIS* ПРИ КЛИНОСТАТИРОВАНИИ

Вивчався вплив зміненої гравітації на експресію актину в коренях тридобових паростків *Beta vulgaris*, що росли в умовах горизонтального клиностатування (2 об/хв). Показано, що клиностатування не викликає змін загальної кількості актину в тканинах. Виявлено три ізоформи актину, співвідношення кількості білку в них було подібним в клиностатованих і неклиностатованих паростках. Це свідчить про стабільні експресію актину в умовах зміненої гравітації.

Введение. Во многих концепциях гравичувствительности растений цитоскелет рассматривают как один из основных компонентов клеточной системы восприятия и передачи гравитационного стимула [6]. Участие актиновых микрофиламентов в гравичувствительности показано как в специализированных [14], так и в неспециализированных к восприятию гравитационного стимула клетках [13]. Актиновые микрофиламенты — структура высокодинамичная, отвечающая быстрой реорганизацией на различные внешние воздействия.

Актин характеризуется множественностью молекулярных форм, уровень экспрессии которых различается по временным и пространственным характеристикам [11]. Предполагают, что большое количество изоформ актина определяется их разной функциональной нагрузкой [4]. Изменения в соотношении актиновых изоформ при кратковременном воздействии микрогравитации в условиях параболического полета и быстрого клиностатирования показаны на протопластах клеток мезофилла, не специализированных к восприятию гравитационного сигнала [12]. Вместе с тем согласно унифицированной концепции стресса, при непродолжительном влиянии фактора в растении развивается быстрая неспецифическая стрессовая реакция, в то время как для адаптации клеток требуется более длительное действие фактора [1].

Целью данной работы было изучение влияния клиностатирования на количество актина и состав его изоформ в растительных клетках в том случае, когда прорастание и рост проростка осуществляется при постоянном вращении в гравитационном поле.

Материалы и методы. Исследования проводили на корнях проростков *Beta vulgaris* (с. Бордо 237). Сплюдия проращивали в темноте при 22 °C в условиях стационарного контроля или горизонтального клиностатирования (2 об/мин) в течение 3 сут. Актин изучали методами твердофазного имму-

ноферментного анализа (ИФА) и иммуноблоттинга после одномерного и двумерного электрофоретического разделения суммарных белков в полиакриламидном геле (ПААГ). Корни трехсуточных проростков отрезали на льду. Навески корней по 300 мг гомогенизировали в замороженном состоянии в фарфоровой ступке с пестиком.

Для ИФА белок экстрагировали с ФСБ pH7.4. Содержание белка в экстракте определяли по [2]. Экстракт наносили на планшет по 100 мкг белка с последовательными 2-кратными разведениями в четырех повторностях. Для выявления актина в ИФА и иммуноблоттингах использовали моноклональные антитела, специфичные ко всем формам актина (Sigma) в разведении 1:1000. Вторичными антителами для ИФА служили анти-мышьиные IgG, коньюгированные с пероксидазой (Sigma). Выявление пероксидазной активности проводили с помощью хромогенного субстрата. Оптическую плотность регистрировали с использованием иммуноферментного анализатора (Bio-Rad, США) при длине волны 405 нм.

Для одномерного электрофореза в денатурирующих условиях (ДДС-На ПААГ) белки экстрагировали буфером, содержащим 100 мМ Трис-HCl, pH7.4, 25 мМ KCl, 10 мМ MgCl₂ и протеопротектор 2 мМ ФМСФ. Для подготовки белков к электрофорезу в экстракт добавляли буфер, содержащий 2 М Трис-HCl, pH8.7, 8 % ДДС-На, 0.4 М 2-меркаптоэтанол (на 3 объема экстракта 1 объем буфера), прогревали 3 мин при 90 °C, белок осаждали ацетоном и растворяли в буфере, содержащем 80 мМ имидазол pH6.8, 10 % глицерин и 2 % ДДС-На. Образцы (по 20 мкг белка) разделяли в 10 %-м ДДС-На-ПААГ по [7]. Двумерное электрофоретическое разделение белков проводили по [3]. Белки солюбилизировали в буфере, содержащем 9 М мочевину, 2 % нонид P-40, 2 % 2-меркаптоэтанол, 4 % амфолиты pH5-8, 1 % амфолиты pH3.5-10 и 2 мМ ФМСФ. В первом направлении белки

(100 мкг) разделяли изоэлектрофокусированием (ИЭФ) в градиенте pH 4.75-8.0. Прибором для электрофореза служил Mini Dual Gel (Sigma). Гели окрашивали кумасси G-250 или проводили вестерн-блоттинг. Изоэлектрические точки (pI) определяли измерением pH в растворах с фрагментами геля. Для определения молекулярной массы белков использовали белки — стандарты фирмы Sigma.

Для вестерн-блот-анализа полипептиды, разделенные в одномерном или двумерном ПААГ, переносили на нитроцеллюлозную мембрану (Amersham). Вторичными антителами служили анти-мышечные IgG, коньюгированные с биотином (Sigma). Биотин визуализировали через экстравидин-пероксидазную систему (Sigma), выявляя пероксидазную активность с помощью SIGMA FAST™ DAB. Для анализа гелей и блотов использовали компьютерную программу *ImageMaster™ TotalLab*, version 2.00 (Amersham). Все эксперименты проводились на менее чем в 2-кратной повторности.

Результаты исследований. Результаты проведенных экспериментов показали, что рост корней клиностатированных проростков *B. vulgaris* дезориентирован, в отличие от проростков, растущих в норме, корни которых ориентированы по гравитационному вектору. Электрофоретическое разделение суммарных белков корней в ДДС-На-ПААГ и анализ полученных электрофореграмм показал, что белковый спектр в клиностатном варианте не отличается от такового в контроле по гетерогенности спектра и проценту белка в каждой зоне (рис. 1, а). С помощью иммуноблоттинга выявлено две зоны (рис. 1, б): актин с молекулярной массой около 45 кД и слабоокрашенная зона с более высокой электрофоретической подвижностью. Денситометрирование иммуноблота показало, что количество актина в клиностатном варианте равно 69084 ± 5247 пкг и 65057 ± 3988 пкг в контроле, что говорит о сходном количестве актина в обоих вариантах. Данные ИФА подтвердили, что различия между вариантами по количеству актина недостоверны (рис. 2).

Двумерное разделение белков с последующей иммунодетекцией актина на мемbrane позволило выявить в обоих вариантах пять иммуноактивных зон (рис. 3): три с молекулярной массой около 45 кД (зоны 1, 2 и 3) и две слабо окрашенные зоны с более высокой электрофоретической подвижностью (зоны 4 и 5). Эти результаты позволяют нам предполагать экспрессию трех изоформ актина (зоны 1, 2 и 3) в корнях 3-сут проростков *B. vulgaris*. В различных растительных объектах с использованием двумерного электрофореза разделяют от двух до восьми изоформ актина [10]. Слабо окрашенные более подвижные зоны выявлялись как при одно-

мерном, так и при двумерном разделении белка; поскольку система выделения белка при этом различна, то возможность артефакта в результате изменений полипептидной цепи в ходе приготовления образцов белка снижается. Эти зоны могут быть продуктами деградации актина, т. к. известно, что антитела, реагирующие со всеми формами актина, также реагируют и с некоторыми продуктами его распада [5]. Кроме того, учитывая, что аминокислотная последовательность актинов имеет определенное сходство с актин-зависимыми белками (от 27 до 45 % идентичности у *Arabidopsis*) [9], нельзя исключать и возможности слабой неспецифической иммунной реакции с такими белками. Определение градиента pH в изоэлектрофокусировочном геле

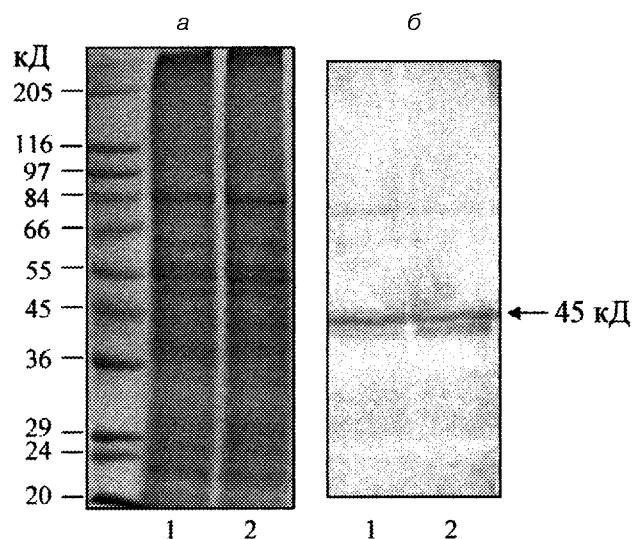


Рис. 1. Электрофореграммы белков после разделения в ДДС-На-ПААГ (а) и иммуноблоты актина (б) из корней клиностатированных (1) и растущих в норме (2) проростков *B. vulgaris*

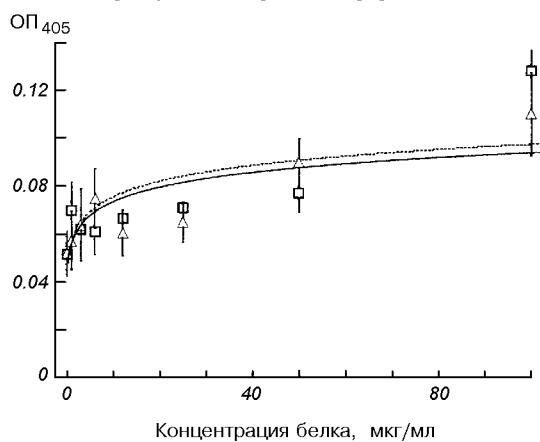


Рис. 2. Относительное количество актина в экстракте белка из корней клиностатированных и растущих в норме проростков *B. vulgaris* по данным ИФА

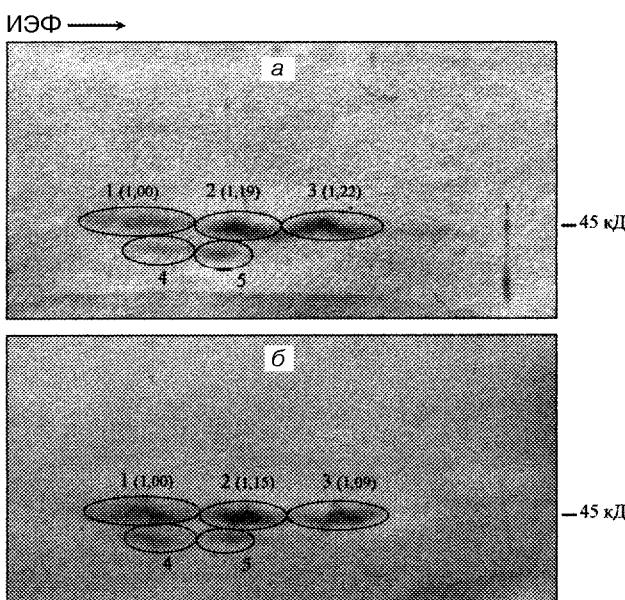


Рис. 3. Иммуноферты актина после двумерного электрофоретического разделения в ПААГ белков из корней растущих в норме (а) и клиностатированных (б) проростков *B. vulgaris*. В скобках указана относительная интенсивность окрашивания зон актина, определенная с использованием ImageMasterTM TotalLab

позволило определить, что рI изоформ актина равно 5.65(1), 5.80(2) и 5.95(3). Это согласуется с данными других исследователей о том, что актин — кислый белок и рI его изоформ у растений лежит в интервале рН от 5.1 до 6.05 [10, 12]. Сравнительный анализ интенсивности окрашивания зон показал, что относительное количество белка в каждой зоне различается между вариантами незначительно. Полученные результаты дают основание полагать, что экспрессия изоформ актина не подвержена существенному влиянию длительного клиностатирования, и их участие в ответе клетки на действие измененной гравитации, по-видимому, осуществляется в основном за счет динамичной реорганизации сети микрофиламентов в клетках.

На протопластах клеток мезофилла показано, что кратковременное (3–15 мин) влияние микрогравитации в параболическом полете и при клиностатировании приводило к потере двух изоформ актина клетками [12]. Это может быть быстрой стрессовой реакцией клеток на изменение вектора гравитации и предполагает функциональную неэквивалентность и различную стабильность отдельных изоформ. Согласно современной теории стресса после быстрой неспецифической реакции наступает стадия адаптации, в ходе которой клетка переходит в новое устойчивое функциональное состояние [8]. Мы предполагаем, что выявленная нами стабильность белковых и актиновых спектров свидетельст-

вует о том, что прорастание и рост проростков при постоянном вращении в гравитационном поле дает возможность растению в значительной степени адаптироваться к этим условиям, в частности на уровне экспрессии молекулярных форм актина.

1. Кордюм Е. Л., Сытник К. М., Бараненко В. В. и др. Клеточные механизмы адаптации растений к неблагоприятным воздействиям экологических факторов в естественных условиях. — Киев: Наук. думка, 2003.—277 с.
2. Bradford M. M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Anal. Biochem.—1976.—72.—P. 248—254.
3. Jones P. P. Analysis of radiolabeled lymphocyte proteins by one- and two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis // Immunology / Eds B. B. Michell, S. M. Sniogi. — S. F., Freeman, 1980.—P. 398—440.
4. Kandasamy M. K., McKinney E. C., Meagher R. B. Functional nonequivalency of actin isoforms in *Arabidopsis* // Mol. Biol. of the Cell.—2002.—13.—P. 251—261.
5. Kandasamy M. K., Meagher R. B. Actin-organelle interactions: association with chloroplast in *Arabidopsis* leaf mesophyll cells // Cell Motil. Cytoskeleton.—1999.—44.—P. 110—118.
6. Kordyum E. L. A role for the cytoskeleton in plant cell gravisensitivity and Ca²⁺-signaling in microgravity // Cell Biol. Int.—2003.—27.—P. 219—221.
7. Laemmli U. K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 // Nature.—1970.—227, N 5259.—P. 680.
8. Lichtenhaler H. K. The stress concept in plants: An introduction // Stress of life from molecules to man: Annals of the New York Academy of Sciences. — New York, 1998.—P. 187—198.
9. McKinney E. C., Kandasamy M. K., Meagher R. B. *Arabidopsis* contains ancient classes of differentially expressed actin-related protein genes // Plant Physiol.—2002.—128.—P. 997—1007.
10. McLean B. G., Huang S., McKinney E. C., Meagher R. B. Plants contain highly divergent actin isoforms // Cell Motil. Cytoskeleton.—1990.—17.—P. 276—290.
11. Meagher R. B., McKinney E. C., Kandasamy M. K. Isovariant dynamics expand and buffer the responses of complex systems: the diverse plant actin gene family // Plant Cell.—1999.—11.—P. 995—1005.
12. Schnabl H., Hunte C., Schulz M., et al. Effects of fast clinostat treatment and microgravity of *Vicia faba* L. mesophyll cell protoplast ubiquitin pools and actin isoforms // Microgravity Sci. Technol.—1996.—9/4.—P. 275—280.
13. Shevchenko G. V., Kordyum E. L. Orientation of root hair growth is influenced by simulated microgravity // Annu. Int. Gravit. Physiol. Meeting, 22–27 April, 2001, Budapest, Hungary.
14. Sievers A. From gravitational to space biology in Bonn Newsletter ASGSB // Newsletter ASGSB.—2000.—16.—P. 18—25.

ACTIN OF *BETA VULGARIS* SEEDLINGS UNDER THE CLINOROTATION

L. Ye. Kozeko

We study the influence of altered gravity on actin expression in roots of *Beta vulgaris* seedlings grown on the horizontal clinostat (2 rpm) from seed germination for three days. It is shown that the total actin quantity was not influenced. Three actin isoforms are revealed; a relative protein quantity of these isoforms was similar both in clinorotated seedlings and in ones grown in norm. This points to stable expression of actin under the altered gravity conditions.

© N. O. Kozyrovska¹, O. S. Korniichuk¹, T. M. Voznyuk¹,
M. V. Kovalchuk¹, T. L. Lytvynenko¹, I. S. Rogutskyy²,
O. V. Mytrokhyn³, V. R. Estrella-Liopis⁴, T. I. Borodinova⁴,
S. P. Mashkovska⁵, B. H. Foing⁶, V. A. Kordyum¹

¹Institute of Molecular Biology & Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

²Institute of Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³Kyiv National University Taras Shevchenko, Ukraine

⁴Institute of Biocolloidal Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

⁵Botanical Garden of National Academy of Sciences, Ukraine, Kyiv

⁶European Space Agency Research and Scientific Support Department, The Netherlands, Noordwijk

MICROBIAL COMMUNITY IN A PRECURSORY SCENARIO OF GROWING TAGETESPATULA IN A LUNAR GREENHOUSE

A confined prototype plant-microbial system is elaborated for demonstration of growing pioneer plants in a lunar greenhouse. A precursory scenario of growing *Tagetes patula* L. in a substrate anorthosite which is similar mineralogically and chemically to lunar silicate rocks includes the use of a microbial community. Microorganisms served for preventive substrate colonization to avoid infection by deleterious microorganisms as well as for bioleaching and delivering of nutritional elements from anorthosite to plants. A model consortium of a siliceous bacterium, biocontrol agents, and arbuscular mycorrhizal fungi provided an acceptable growth and blossoming of *Tagetes patula* L. under growth limiting factors in terrestrial conditions.

INTRODUCTION

The plants will be a practical necessity for humans living in permanently manned lunar bases, and they will provide fresh food, oxygen, and clean water for lunar explorers. The ornamental plants are needed for psychological purpose. Combining esthetic impression with more practical traits such as medicinal, nutritional, biopesticidal, some ornamental plants could be considered as a valuable element of regenerative life support system in lunar habitats. It is anticipated that lunar regolith will be used as a substrate for plant growing at the early beginning of missions. Some petrogenic elements that compose lunar minerals (Fe, K, Na, Ca, etc.) may serve as an essential source of plant nutrition ions. Potentially, nearly a half of them the plant could get from a lunar rock, and such ions could be leached from lunarsourced rocks by microorganisms. This would reduce the cost of a plant nutrition program. It is well established that some species of bacteria of genus *Bacillus* are able to dissolve alumino-silicates and to liberate elements like Fe, Si, K, etc., from rocks, making them available for the plant [1, 5, 11, 19]. Bacteria belonging to the genera *Thiobacillus* and *Pseudomonas* as well as fungi belonging to the genus *Cladosporium* were also shown to destroy alumino-

silicates [14, 17]. Siliceous and some other bacteria as well as fungi could be used for bioleaching the lunar regolith.

Except bioleaching, microbial communities may serve as means to optimize plant growth regime via provision of substances for nutrition, growth regulation, plant protection against pathogens, via removing plant 'wastes' and improving the plant environment [3, 8]. The use of microbial communities in lunar garden will allow one to avoid imbalance in microbial cenosis because the microorganism-free lunar rocks (used as a substrate) might be colonized with accidentally delivered from the Earth deleterious micro-astronauts. Colonization of the plant/substrate system by bacteria-antagonists would be the preventive means that could protect the plant from occupancy of phytopathogenic microorganisms and therefore stabilize a microbial community in artificial ecosystems.

A water movement within the plant would be a paramount issue at low atmospheric pressure on the Moon. The means by which plants can avoid desiccation may be arbuscular-mycorrhizal (AM) fungi that improve water regime in plants [2]. In addition, AM fungi are known as transporters of cations of metals to the plant [6, 18], and they could be used for inoculations of soil sources of low bioavailability.

Especially they are active in company with mycorrhiza helper rhizobacteria [20]. In such soils AM could increase absorption and translocation to the plant of ions released from rocks by bacteria. The purpose of this research is experimental examination of the use of rationally assembled defined microbial community in a precursory scenario of cultivating *Tagetes patula* on silicate substrate in the controlled environment.

MATERIALS AND METHODS

Prototype plant growth system includes French marigold (*Tagetes patula* L. cv. Carmen) that has been chosen due to a set of beneficial traits. Wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Katyusha) was used for determination of phytotoxic effect of model bacteria. *Silicate rocks* were used in this study: anorthosite (deposits Penizevichi and Turchynka, both from Kostroten Pluton, Zhytomyr region) and silica rock (Khmelnytskyi region) in fractions of 5.0 mm fragments and as dust (less than 0.5 mm). Rocks were fragmented and milled when needed and heated during 2 h at 600 °C.

Microorganisms were used in experiments: *Pseudomonas* sp. IMBG163, *Pseudomonas aureofaciens* IMBG164, *Xanthomonas maltophilia* IMBG147, *Paenibacillus* sp. IMBG156, *Klebsiella oxytoca* IMBG26, and *Pantoea agglomerans* IMV56 (kindly provided by Prof. R. Gvozdyak, Institute of Microbiology and Virology of NASU). *Glomus* sp. isolated from the zinc violet in FRG and kindly provided by H. Bothe (Cologne University).

Cultivation and identification of microorganisms. Bacteria were cultivated overnight in the following liquid media: *Paenibacillus* sp. — in MZ [15], *Pseudomonas* sp. IMBG163 — in KB [7], and rest of species — in LB [12] and used at a density of 10⁶ CFU/ml for seed or substrate inoculation. To estimate external root colonization, root sections were vortexed in 0.9 % NaCl, and serial dilutions were plated in LB to discriminate between *P. aureofaciens* and *P. agglomerans* (on orange and yellow colony color); *Pseudomonas* sp., and *Paenibacillus* sp. — in KB and MZ, respectively. To isolate *K. oxytoca* and *X. maltophilia*, chloramphenicol and rifampicin (both of 50 µg/ml) were added to LB agar, respectively. Microscopic analysis of bacteria was performed by standard staining the sample after fixation under microscope ML-2 (LOMO, Russian Federation). Visualization of fungi was conducted with standard method of incubation of roots with lactic acid [16].

Culture-independent method T-RFLP was used for the study of bacterial community composition. The

communities harvested from fresh plant material (both a stem and a root), and isolated whole-community DNA was analyzed, using T-RFLP (Terminally Labeled Restriction Fragment Length Polymorphism) in ALF System (Pharmacia). Total DNA isolation from plant material was performed as a manufacturer of the kit, the MoBio (USA), specifies. Fragments of the *rrn* gene (16S rDNA) of the bacteria associated with plant were amplified with the eubacterial primers F507 (labeled at the 5'end with Cy5) and R1353 and subjected to a T-RFLP analysis. The primers were synthesized in Syntol (Russian Federation). In preliminary experiments characteristic sizes of T-RFs (*Hha*I and *Hae*III, Fermentas, Lithuania) for either bacterium of consortium have been determined.

The evolution of bacterial population of Paenibacillus. Batch experiments were performed in a 50 ml stationary culture where a rock or a dust material (0.5 g) were used. The evolution of bacterial population of *Paenibacillus* was monitored within a period of two months. Samples of whole population [unattached and attached bacteria; the latter were washed off with Tween 20 (0.02 %) on shaker during 30 min] were in parallel spread on selective MZ agar and examined microscopically to enumerate periodically their presence in the system. Corrosion of rocks was determined visually and microscopically.

Absorption of Paenibacillus exometabolites on the surface of anorthosite particles was examined by method of microelectrophoresis [4]. Bacterial exopolysaccharide (EPS) was extracted as Zakharova recommended [24].

Plant growth conditions. Plastic transparent containers of (160 by 90 mm) or growth chambers of a locker-based facility with an experiment hardware and facility infrastructure, the Plantkord, were used to produce the substrate-plant microcosms. Portions (260 g) of either substrate (anorthosite or zeolite) were added to the microcosms. The sterile phosphate solution was pumped by a peristaltic pump located outside the containers through a valve at the bottom of each chamber below the surface of the substrate in the first case, and automatically in the second case. The inoculum of *Glomus* sp. has been added to inorganic substrates (10 %) when needed. The microcosms were planted with ten seeds or left unplanted. The growth containers were accommodated within the controlled environment room under a 16/8 day (light/dark) photoperiod with light supplied at an intensity of 55 µmolm⁻²s⁻¹ and 22 °C. Disinfections of seeds when needed was performed with 1.0 % sodium hypochlorite supplemented with 0.02 % Tween-20 for 1 min, followed by incubation in 70 % ethanol

(1 min) and washing three times (1 min each time). At the end of the experiment all plants were harvested and morphometric analyses were performed.

Statistical tests of the significance of differences between means were based on Student's T-test.

RESULTS AND DISCUSSION

Growth of silicate bacterium *Paenibacillus* sp. on silicate substrates. Two types of anorthosite served us for demonstration of its availability to be used as both a substrate and a source of macro- and microelements for plant growing. Anorthosites of Turchynka type are composed of olivine, orthopyroxen, plagioclase minerals (mainly, labradorite) and are most similar to lunar anorthosite chemically and mineralogically [10]. Anorthosite of Penizevichi deposit is plagioclase of 73–86 %, and accessory minerals compose a group of olivin, ilmenite, orthoclase, biotite [13].

The Penizevichi type of anorthosite as lunar rock analog and silica rock as additional specimen have been used to study the pattern of colonization and survival of *Paenibacillus* sp. on fragments of rocks and on dust. The siliceous bacterium *Paenibacillus* sp., natural resident of the earthly silica, has been isolated and shown its friendly relationships with a variety of gramnegative bacteria [15]. Attempts were made to determine the proportions of bacteria attached to solid particles or freely suspended in the medium using a combination of serial dilutions and a microscopic technique. Results represented in Table 1 display change in the population size of *Paenibacillus* sp. culturable cells in different microcosms. The attached cells looked like long vegetative slime cells without spores and covered with a huge amount of exopolysaccharide, on contrast to freely suspended in the medium cells, middle-sized, mainly spore-conferring. Microscopic observation revealed that the attached bacteria were more physiologically active, and that might be connected with their putative capability of

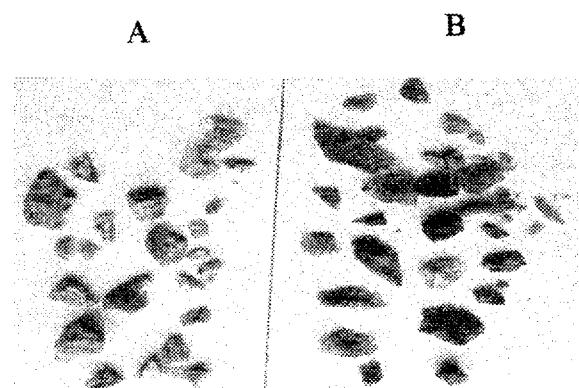


Fig. 1. Images of anorthosite rocks: A — after a contact with a nutrient medium (without bacteria) within a month; B — with the culture of *Paenibacillus* sp.

biodegradation/bioleaching of anorthosite [5, 17]. The same difference in a single population has been demonstrated earlier between attached and unattached cells with respect to traits such as cell size, reproductive rate, and exopolymer production [9, 22, 23]. Our data support the hypothesis of Vandevivere and Kirchman (1993) that solid surfaces may stimulate attached bacteria to produce exopolymers [21].

Corrosion on the Penizevichi anorthosite surface (as well as on silica rock) was observed by the naked eye after 28 days of incubation under optimal conditions (Fig. 1). It was expressed in a formation of iron oxide. The same changes we observed on surface of the Turchynka type anorthosite which served as a substrate for marigold growing at the end of the plant vegetation. No signs of changes were observed in both unplanted and planted chambers without bacteria.

Adhesion of bacteria on silicate particles. The initial stage of bioleaching/biodegradation is bio-adhesion of microorganisms on mineral surface. A diffusion layer of exometabolites (that is different in different microbes) plays a crucial role in bioadhesion/heterocoagulation [4]. Water-soluble exometabolites, including EPS, being absorbed on surface of certain mineral, change the charge of the target surface (the ζ -potential) and thus a power of electrostatic repulsion. Absorption of both small quantities of EPS and total exometabolites produced by *Paenibacillus* sp. resulted in a change of the ζ -potential of anorthosite particles, on contrast to control specimen of mineral (in absence of biomaterial) (Fig. 2). Estimation showed that *Paenibacillus* needed at least 200 times less EPS for attachment than it was able to produce. Anxiety about possible destroying EPS by bacterial community which are able to consume it as carbon source was not sound.

Table 1. Average Populations of the *Paenibacillus* Sp. Culturable Cells in Presence of Different Silicate Substrates

Variant of a substrate	Unattached, CFU/ml		Attached*, CFU/g	
	7 days	28 days	7 days	28 days
Anorthosite, rocks (Penizevichi)	2000	82	11	2.3E+05
Anorthosite, dust	2100	1.0E+07	—	—
Silica, rocks	130	12	62	1.7E+05
Silica, dust	10	3.6E+07	—	—

* Bacterial cell were washed off from silicate rocks

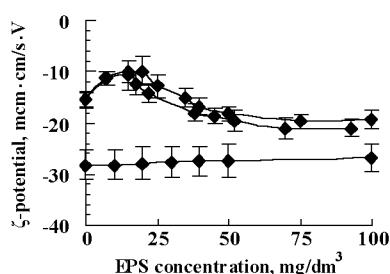


Fig. 2. Dependence of the electrokinetic ξ -potential of anorthosite particles (lines 1 and 2) and silica rock (line 3) on concentration of exopolysaccharide (line 1) and total exometabolites (containing the same quality of EPS produced by *Paenibacillus* sp. (line 2), and EPS synthesised by *Chlorella vulgaris* (line 3)

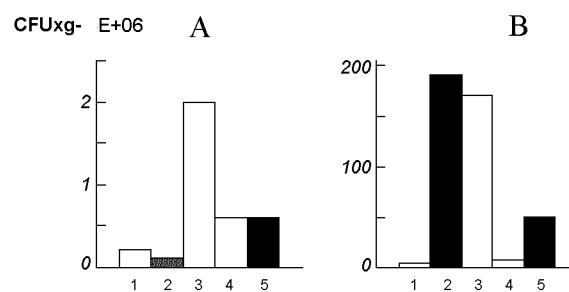


Fig. 3. Dynamics of populations of bacterial assemblage in the marigold rhizosphere: A — two weeks after a planting; B — six weeks later (1 — *Klebsiella oxytoca*, 2 — *Paenibacillus* sp., 3 — *Pseudomonas* sp., 4 — *Pantoea agglomerans*, 5 — *Pseudomonas aureofaciens*)

Table 2. Impact of Bacterial Inoculations on Growth of Wheat in Inorganic Substrate

Variant	Average dry weight of par a plant, g	% to control	Average height of a stem, mm	% to control	Average length of a root, mm	% to control
Control	0.027a	100.0	386a	100.0	110a	100.0
<i>Pseudomonas</i> sp. IMBG163	0.031b	115.7	404a	104.7	125b	113.9
<i>Paenibacillus</i> sp. IMBG156	0.032b	117.0	465b	120.5	1255b	114.1
<i>Pseudomonas</i> sp. + <i>Paenibacillus</i> sp.	0.029b	107.0	353a	94.0	145b	123.0

Note: Values followed by the same letter in a column are not significantly different ($p = 0.05$) by Student's T-test.

Impact of Paenibacillus sp. on development of plant growth in zeolite. According to the cumulative data gained, *Paenibacillus* sp. had a positive impact on wheat growth (Table 2). Average dry weight of inoculated wheat was higher up to 117 % as compared to control, and affected both development of shoots and root system positively.

A study of the marigold rhizosphere bacterial composition of consortium was performed after two and six weeks of plant growth. Temporal changes in community composition resulting from species replacement could be expected in microcosms just as they do in natural systems. There were no shifts in community composition in the rhizosphere of marigold within six weeks. Analysis of bacterial community by culture-independent method showed that bacteria were able to colonize plant roots and survive within plant vegetative period (data not shown). In parallel, it was exhibited by microbiological method that there were differences in the number of CFU of either strain among different sampling times within a 45-day period. Number of bacteria isolated from 1 g of fresh root increased ten-fold in populations of *K. oxytoca* and *P. agglomerans*, and hundred-fold in populations of both species of pseudomonads. Exception was *Paenibacillus* sp. that at the beginning of period of examination had a small-size population and later,

after two weeks, was getting to develop rapidly. Finally, it had outgrown the partners in the consortium (Fig. 3). The growth of this bacterium seems to be favored by both bacterial partners and plant-host. It has to be noted that the *Paenibacillus* rhizosphere population had originated from a substrate where it was applied initially, on contrast to other partners that were used for seed inoculation.

Tagetes patula have been colonized well by *Glomus* sp. which formed arbuscules inside the plant roots.

Marigold seed germination in anorthosite substrate was stimulated by bacterial consortium and approached to 100 %. Control seeds (without bacteria) germinated 50–80 % worse as compared to inoculated ones. After a period of 54 days cocultivation of French marigold with the consortium of microorganisms the plant began to blossom. The control plants died after 3–4 weeks of growth.

1. Alexandrov V. G., Zak G. A. Bacteria, destroying aluminosilicates (silicic bacteria) // Microbiologia.—1950.—19.—P. 97—104 (in Russian).
2. Brundrett M., Castro V. A., Thrasher A. N., et al. Microbial characterization during the early habitation of the international space station // Microbial Ecology.—2004.—47, N 2.—P. 119—126.
3. Chistoserdova L., Laukel M., Portais J. C., et al. Multiple formate dehydrogenase enzymes in the facultative methylotroph *Methyllobacterium extorquens* AM1 are dispensable for growth

- on methanol // J. Bacteriol.—2004.—186.—1.—P. 22—28.
4. Estrella-Liopis V. R., Ovcharenko F. D., Yurkova I. N. Diffusion layer of extracellular metabolites and selective heterocoagulation of mineral particles and microorganisms // Phys.-Chem. Mechanics and lyophilicity of Disperse Systems.—1991.—B22.—P. 1—10.
 5. Groudev S. N. Biobeneficiation of mineral raw materials // Minerals and Metallurgical Processing.—1999.—16, N 4.—P. 19—28.
 6. Killham K., Firestone M. K. Vesicular-arbuscular mycorrhizal mediation of grass response to acidic and heavy metal deposition // Plant Soil.—1983.—72.—P. 32—48.
 7. King E. O., Ward M. K., Raney D. E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // J. Lab. Clin. Med.—1954.—44.—P. 301—307.
 8. Kozyrovska N. O., Kovtunovych G. L., Lar O. V., et al. A modeling molecular plant-bacteria interactions // Kosmichna Nauka i Technologiya (Space Science and Technology).—2002.—8.—P. 81—85.
 9. Lehman R. M., Roberto F. F., Earley D., et al. Attached and unattached bacterial communities in a 120-meter corehole in an acidic, crystalline rock aquifer // Appl. Environ. Microbiol.—2001.—67.—P. 2095—2106.
 10. Lychak I. L. Petrology of Korosten Pluton. — Kyiv: Naukova dumka, 1983.—248 p.
 11. Malinovskaja I. M., Kosenko L. B., Votcelko S. K., et al. Role of the *Bacillus mucilaginosus* polysaccharide in the process of siliceous minerals destruction // Microbiologia.—1990.—59.—P. 70—78 (in Russian).
 12. Miller J. H. Experiments in molecular genetics. — Cold Spring Harbor Laboratory.—1972.—436 p.
 13. Mytrokhyn O. V., Bogdanova S. V., Shumlyansky L. V. Anorthosite rocks of Fedorivskyy suite (Korosten Pluton, Ukrainian Shield) // Current problems of geological science. — Kyiv: Kyiv State University, 2003.—P. 53—57.
 14. Natarajan K. A., Modak J. M., Anand P. Some microbiological aspects of bauxite mineralization and beneficiation // Minerals and Metallurgical Processing.—1997.—14.—P. 47—53.
 15. Negrutska V. V., Kozyrovska N. O. Ecologically-friendly crop production with microbial inoculants. I. The Dual, technology for inoculant production // Int. Conf. Natural Ecosystems of the Carpathian Mountains Under Conditions of Intensive Anthropogenic Impact, October 4-7, 2001, Uzhhorod, Ukraine.—2001.—P. 76—79.
 16. Phylips J. M., Hayman D. S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection // Trans. Br. Mycol. Soc.—1970.—55.—P. 158—161.
 17. Rohwerder T., Gehrke T., Kinzler K., et al. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation // Appl. Microbiol. Biotechnol.—2003.—63.—P. 239—248.
 18. Sorochinski B. V., Kozyrovska N. O. Biotechnological aspects of phytoremediation of the objects in the environment from radionuclide pollution // Agrobiotechnology.—1998.—2.—P. 123—130 (in Ukrainian).
 19. Styriakova I., Styriak I., Galko I., et al. The release of iron-bearing minerals and dissolution of feldspars by heterotrophic bacteria of *Bacillus* species // Ceramics-silikaty.—2003.—47.—P. 20—26.
 20. Toro M., Azcon R., Barea J. Improvement of arbuscular mycorrhiza development by inoculation of soil with phosphate-solubilizing rhizobacteria to improve rock phosphate bioavailability ($\text{^{32}P}$) and nutrient cycling // Appl. Environ. Microbiol.—1997.—63.—P. 4408—4412.
 21. Vandevivere P., Kirchman D. L. Attachment stimulates exopolysaccharide synthesis by a bacterium // Appl. Environ. Microbiol.—1993.—59.—P. 3280—3286.
 22. Van Loosdrecht M. C. M., Lyklema J., Norde W., et al. Influence of interfaces on microbial activity // Microbiol. Rev.—1990.—54.—P. 75—87.
 23. Yan L., Boyd K. G., Adams D. R., et al. Biofilm-specific cross-species induction of antimicrobial compounds in bacilli // Appl. Environ. Microbiol.—2003.—69.—P. 3719—3727.
 24. Zakhарова I. Ya., Косенко L. B. Methods of microbial polysaccharides study. — Kyiv: Naukova dumka, 1982.—P. 9—10 (in Russian).

ВИКОРИСТАННЯ МІКРОБНОЇ СПІЛЬНОТІ У ПОПЕРЕДНЬОМУ СЦЕНАРІЇ ВИРОЩУВАННЯ TAGETES PATULA У МІСЯЧНІЙ ОРАНЖЕРІ

Н. О. Козирівська, О. С. Корнійчук, Т. М. Вознюк, М. В. Ковальчук, Т. Л. Литвиненко, І. С. Рогуцький, О. В. Митрохин, В. Р. Естрела-Льопіс, Т. І. Бородінова, С. П. Машковська, Б. Г. Фойгт, В. А. Кордюм

Розроблено прототип замкненої системи рослина-мікроорганізми для демонстрації можливості вирощування перших рослин у місячній оранжерей. Попередній сценарій вирощування *Tagetes patula* L. у субстраті анортозиту, який подібний до місячної породи як за складом мінералів, так і за хімічною будовою, передбачає використання мікробної спільноти. Мікроорганізми слугували для запобіжного заселення субстрату з метою уникнення інфекції шкідливих мікроорганізмів, а також для видобування та доставки поживних елементів з анортозиту до рослин. Модельний консорціум силікатної бактерії, бактерій-антагоністів та мікоризних грибів забезпечував задовільний розвиток та цвітіння *Tagetes patula* L. у наземних умовах під впливом факторів, що обмежують розвиток рослини.

© Л. Н. Носач, О. Ю. Повница, В. Л. Жовноватая

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИНОСТАТИРОВАНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ПЕРЕВИВАЕМЫХ ЛИНИЙ КЛЕТОК ЧЕЛОВЕКА

Клиностатувація епітеліальних (Hela) і лімфобластоїдних (МТ-4) клітин людини протягом 96—144 год не приводить до значних змін морфології і життєздатності клітин. Зберігається проліферативна активність клітин, функціональна активність мітохондрій і здатність лізосом накопичувати флюорохромом.

Проводимые в течение ряда лет наземные и космические эксперименты свидетельствуют о влиянии микрогравитации на структуру и функциональную активность органелл растительной клетки [6, 7]. В некоторой степени клетки животных также чувствительны к микрогравитации [3, 5, 10]. Условия измененной силы тяжести могут изменять форму, размеры, степень адгезии к субстрату, функциональную активность клеток. Отмечены различия в функциональной активности лимфоцитов, полученных из крови здоровых доноров и культивируемых на орбите или из крови космонавтов [4, 5, 11].

Проведенное нами изучение влияния клиностатирования на состояние перевиваемых клеток человека является первым этапом для последующих исследований особенностей функционирования системы клетка — вирус в условиях микрогравитации.

Объектом исследований были две линии перевиваемых клеток человека: линия эпителиальных клеток Hela (рак шейки матки), которую культивировали в монослое на твердых носителях (стеклянных или пластиковых флаконах) и суспензионная линия лимфобластоидных клеток человека Т-фенотипа — МТ-4. Для моделирования микрогравитации проводили горизонтальное клиностатирование со скоростью 4 об/мин («Клин-1», НПО «Респиратор», Донецк) в течение 96—144 ч.

Клетки Hela предварительно выращивали во флаконах при стационарном горизонтальном положении в термостате (37 °C) в течение 24 ч. Затем часть образцов подвергали клиностатированию при той же температуре. Контролем служили клетки, которые продолжали инкубировать в горизонтальном положении. Лимфобластоидные клетки МТ-4, которые культивируются в суспензии и не требуют твердых носителей, сразу помещали в клиностат. До начала клиностатирования и через каждые 24 ч клиностатирования (24, 48, 72, 96, 120 и 144 ч) определяли жизнеспособность и некоторые показа-

тели функциональной активности клеток. Жизнеспособность клеток определяли двумя методами:

1 — при окраске трипановым синим и подсчете живых и мертвых клеток в камере Горяева;

2 — МТТ-методом, который основан на функционировании дегидрогеназной системы митохондрий живых клеток, способных превращать желтый субстрат 3-(4,5-диметил тиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолий бромид (МТТ) в пурпурно-синий продукт МТТ-формазан, который может быть учтен спектрофотометрически [8]. Мертвые клетки такой способностью не обладают. Оптический сигнал, измеряемый в диапазоне волн поглощения МТТ-формазана ($\lambda = 540\ldots570$ нм) после его растворения, отражает количество жизнеспособных клеток и свидетельствует о функциональной активности митохондрий. Данный метод широко используется для выявления цитотоксичности лекарственных препаратов [9].

Как видно из полученных нами данных (таблица), количество живых клеток линии Hela, определенное при окраске трипановым синим, нарастает с увеличением времени культивирования, хотя при клиностатировании уровень прироста клеток снижен, увеличивается процент мертвых клеток по сравнению с контролем. Результаты по определению жизнеспособности клеток МТТ-методом представлены на рис. 1. Они также свидетельствуют о приросте живых клеток со временем культивирования (как в контроле, так и в опыте).

Таким образом, при клиностатировании эпителиальных клеток Hela в течение 144 ч не только сохраняются живые клетки, но сохраняется функциональная активность их митохондрий и способность клеток к пролиферации. Об этом свидетельствует наличие в культуре митотических клеток, находящихся на разных стадиях митоза. Митотическую активность определяли после флюорохромии фиксированных клеток 0.01 % акридиновым оран-

Влияние клиностатирования на жизнеспособность эпителиальных клеток Hela, выявляемую при окраске трипановым синим

Исследованные клетки	Время исследования, ч	Количество клеток		
		общее	живых	мертвых
До клиностатирования	0	219 999	205 555	14 444
При клиностатировании	24	318 333	281 110	37 222
Контроль	24	245 555	215 555	30 000
При клиностатировании	48	311 111	299 777	38 333
Контроль	48	359 999	315 555	44 999
При клиностатировании	72	372 777	278 888	102 777
Контроль	72	634 444	534 444	96 111
При клиностатировании	144	822 777	329 444	493 333
Контроль	144	1262 777	478 888	783 888

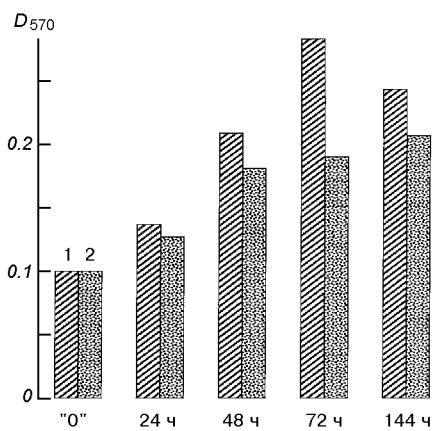
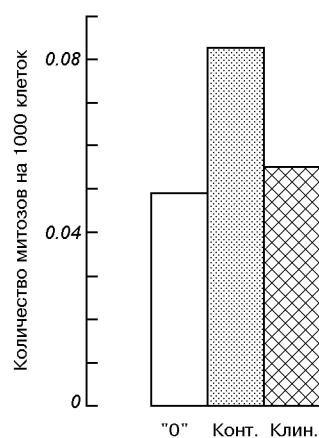


Рис. 1. Влияние клиностатирования на жизнеспособность клеток Hela (MTT-метод): 1 — контрольные, 2 — клиностатированные

жевым и исследовании в люминесцентном микроскопе. В каждом из трех препаратов на один срок исследования определяли количество митотических клеток на 1000 просчитанных. С целью моделирования предстартовых условий суточную культуру клеток инкубировали при $t = +4^{\circ}\text{C}$, затем при 37°C . Опытные образцы подвергали клиностатированию. Как видно из рис. 2, через 48 ч митотическая активность клиностатированных клеток находится на уровне суточной культуры до инкубации на холода, а в контроле — значительно выше.

Используя прижизненную флуорохромию клеток акридиновым оранжевым, мы судили о состоянии лизосом, которые в живых клетках выявляются в виде красно-оранжевых цитоплазматических гранул [1]. Наличие в клиностатированных клетках таких гранул в виде скоплений в околоядерной зоне свидетельствует о сохранности лизосом и способности их накапливать флуорохром.

Рис. 2. Влияние клиностатирования на митотическую активность клеток Hela

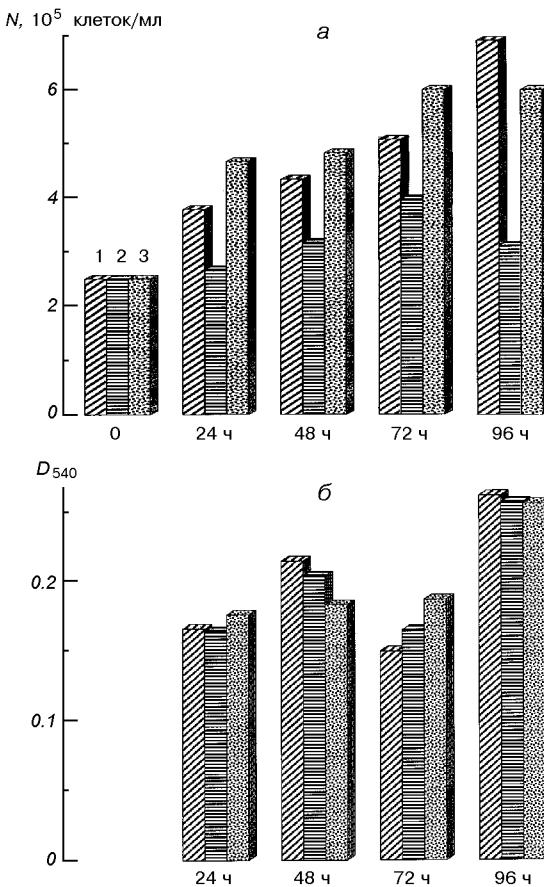


Рис. 3. Влияние клиностатирования на жизнеспособность клеток MT-4 *a* — трипановый синий, *б* — МТТ-метод; 1 — контрольные (+CO), 2 — контрольные (-CO), 3 — клиностатированные

Определение жизнеспособности лимфобластоидных клеток MT-4 при окраске трипановым синим (рис. 3, *a*) свидетельствует об увеличении количе-

ства живых клеток в процессе их культивирования в течение 96 ч по отношению к «0». В связи с тем, что лимфобластоидные клетки культивировались в атмосфере 5 % CO₂, а клиностатирование клеток проводилось без подачи CO₂, использовалось два контроля клеток: инкубируемых в обычных для них условиях при наличии CO₂ и без него. Нами показано, что клетки MT-4 обладают ростовой способностью и в отсутствии CO₂, причем более выраженной при клиностатировании. Клиностатирование не только не снижает жизнеспособности MT-4 клеток, но и сохраняет функциональную активность митохондрий, о чем свидетельствуют результаты применения МТТ-метода (рис. 3, б). В клиностатированных MT-4-клетках также сохраняется функциональная активность лизосом.

Таким образом, перевиваемые клетки человека, культивируемые в условиях микрогравитации, могут быть использованы для изучения взаимоотношений между вирусом и клеткой. Удобной моделью для проведения таких исследований является адено-вирус человека, которому свойственна не только цитоцидная форма взаимодействия с клеткой, приводящая к образованию «потомства» вируса и гибели клетки, но латентная и интегративная — когда вирусная ДНК интегрирует в геном клетки-хозяина. Последние две формы взаимодействия вируса с клеткой могут переходить в цитоцидную, приводящую к развитию инфекционного процесса в случае воздействия неблагоприятных эндо- и экзофакторов. Ранее нами было показано [2], что при длительном клиностатировании адено-вирус сохранял инфекционность. Задачей наших дальнейших исследований будет выяснение возможности и особенностей репродукции адено-вируса человека в условиях микрогравитации.

1. Зеленин А. В. Люминисцентная цитохимия нуклеиновых кислот. — М.: Наука, 1967.—136 с.
2. Носач Л. Н., Дяченко Н. С., Тарасишин Л. А., и др.

Определение в наземных условиях температурного режима, длительности пребывания адено-вируса человека на орбитальных станциях и влияния клиностатирования на некоторые его свойства // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 1.—С. 96—101.

3. Таирбеков М. Г. Гравитационная биология клетки (теория и эксперимент). — М., 1997.—128 с.
4. Cogoli A., Bechler B., Muller O., Hunzinger E. Effect of microgravity on lymphocyte activation // Proc. of the Norderney Symposium of scientific Results of the German Spacelab Mission D1, Norderney, Germany, 27-29 August 1986, Germany, 1986.—P. 366—375.
5. Duke P. J., Montufar-Solis D., Humazaki T., Sato A. Clinorotation of micromass cultures of mouse limb bud cells reduced nodule numbers, but not size // Abstracts 31-st Scientific Assambly of COSPAR 14—21 July, 1996.—The University of Birmingham, England, 1996.—P. 307.
6. Kordyum E. Effects of altered gravity on plant cell processes: results of recent space and clinostatic experiments // Adv. Space. Rev.—1994.—14, N 8.—P. 77—85.
7. Kordyum E. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // Internat. Rev. Cyt.—1997.—171.—P. 1—78.
8. Mosmann T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays // J. Immunol. Methods.—1983.—65, N 1-2.—P. 55—63.
9. Pauwels R., Balzarini J., Baba M., et al. Rapid and automated tetrazolium-based colorimetric assay for the detection of anti-HIV compounds // J. of Virological Methods.—1988.—20.—P. 309—321.
10. Rodionova N. V., Oganov V. S. Morpho-functional adaptation in the bone tissue under the space flight conditions // J. Gravit. Physiol.—2001.—8, N 1.—P. 87—88.
11. Talas M., Batkai L., Stoger I., et al. Results of space experiment program «Interferon» // Acta Microbiol. Hungarica.—1983.—30, N 1.—P. 53—61.

INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF MICROGRAVITY ON THE STATE OF HUMAN CELL LINES

L. N. Nosach, O. Yu. Povnitsa, V. L. Zhovnovataia

Clinostating of epithelial (Hela) and lymphoblastoid (MT-4) human cells over the period from 96 to 144 hours does not cause considerable changes of morphology and viability of the cells. The proliferative activity of the cells, functional activity of mitochondria and the capacity of lysosomes to accumulate the fluorochrom are retained.

© Є. І. Шнюкова, О. М. Недуха

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Київ

ВПЛИВ ІМІТОВАНОЇ МІКРОГРАВІТАЦІЇ НА ФОРМУВАННЯ ЗАПАСНИХ ПОЛІСАХАРИДІВ МІНІ-БУЛЬБ КАРТОПЛІ

Імітація мікрогравітації суттєво впливала на метаболізм запасних полісахаридів міні-бульб картоплі. При тривалому клиностатуванні спостерігали підвищення синтезу, накопичення крохмалю та збільшення активності фосфорилази. В той же час вміст моно- та дисахаридів знижувався, що свідчило про інтенсифікацію їхнього використання для синтезу крохмалю. Відмічено кореляцію між збільшенням активності фосфорилази та зростанням вмісту крохмалю.

Мікрогравітація здійснює суттєвий вплив на ріст і розвиток рослин [6], зокрема на формування їхніх запасальних органів, прискорюючи їхнє утворення, збільшення розмірів, спричиняючи морфологічні зміни клітин [7, 9]. Враховуючи, що умови мікрагравітації можуть впливати на окремі сторони метаболізму рослинних організмів, в тому числі на формування запасних поліглюканів, метою даної роботи було дослідження впливу імітованої мікрагравітації на розвиток та деякі аспекти вуглеводного обміну міні-бульб картоплі. Аналізувалось формування маси міні-бульб, їхня оводненість, вміст низькомолекулярних вуглеводів — моно- та дисахаридів, запасного поліглюкану — крохмалю в сухій і сирій біомасі, а також у кожній окремій бульбі у процесі формування бульб та в різні періоди року. Прослідковувались зміни активності, електрофоретичної гетерогенності ферменту обміну крохмалю — фосфорилази, однією з функцій якої поряд з гідролітичною спрямованістю є каталіз синтезу одного з компонентів крохмалю — амілози шляхом глюкозильного переносу з глюкозо-1-фосфату.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень були міні-бульби картоплі (*Solanum tuberosum* L., сорт Адрета), які вирощувались в умовах імітованої мікрагравітації (горизонтальне клиностатування в режимі 2 об/с) та стаціонарного контролю. Біомаса аналізувалась в процесі формування бульб на 10-ту та 30-ту добу в різні періоди року. Вміст моно- і дисахаридів, крохмалю в міні-бульбах картоплі визначали фотометрично анtronовом методом за Болотовою та ін.

[1]. Активність фосфорилази досліджували згідно з методикою, викладеної в роботі [3] з наступним визначенням кількості фосфору колориметрично за утворенням «молібденової сині» за [4]. Активність фосфорилази виражали в мкМ фосфору, який вільнявся з глюкозо-1-фосфату за 1 хв при температурі $t = 37^{\circ}\text{C}$ на 1 г сирої або сухої маси, а також на 1 мг білку. Для характеристики ізоферментів фосфорилази застосовували вертикальний пластинчатий електрофорез в поліакриlamідному гелі. Індикатором фронту служив бромфеноловий синій. Синтетична реакція ферменту здійснювалась шляхом полімеризації в гель як «затравки» глікогену або крохмалю [5]. Розраховувалась відносна електрофоретична рухливість ізоферментів (Rf). Білок визначали за методом Лоурі та ін. [8], сира та суха маса бульб, ступінь їхньої оводненості — ваговим методом. Аналізувались параметри маси та біохімічні показники 8—26 міні-бульб. Біохімічні дослідження проводились в 3—10 паралельних повторностях. Здійснювалась статистична обробка даних, достовірність різниці середніх показників вираховувалась згідно з критерієм Стьюдента з вірогідністю 95 і 99 %.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Встановлено поступове зростання вмісту крохмалю у процесі формування міні-бульб картоплі від 10-ї до 30-ї доби їхнього росту. Інтенсивність цього процесу переважала в умовах імітованої мікрагравітації порівняно із стаціонарним контролем. Так, якщо в бульбах контрольного варіанту на 30-ту добу відкладалось $57.27 \pm 1.09\%$ крохмалю в розрахунку на суху масу, то при клиностатуванні

Таблиця 1. Вплив імітованої мікрогравітації на вміст вуглеводів та біомаси у 10- та 30-денних міні-бульбах картоплі

Показники	Вік міні-бульб картоплі, доби			
	10		30	
	контроль	клиностатування	контроль	клиностатування
Маса однієї міні-бульби, мг: суха сира	8.44±1.25 29.50±5.51	5.72±0.38 24.78±2.51	12.96±1.80 42.00±6.63	8.28±0.84 29.80±2.80
Суха маса, %	28.64	23.09	30.85	27.80
Вода, %	71.36	76.91	69.15	72.20
Моно-, дисахариди, %				
сухої маси,	5.83±0.12	7.61±0.09*	5.01±0.24	3.20±0.16*
сирої маси,	1.67±0.04	1.83±0.01*	1.54±0.07	0.89±0.05*
Однієї бульби, мг	0.492	0.435	0.649	0.264
Крохмаль, %				
сухої маси,	46.02±0.72	65.96±0.95*	57.27±1.09*	70.90±1.49*
сирої маси,	12.71±0.59	15.10±0.79*	17.69±0.34*	19.95±0.54*
Однієї бульби, мг	3.880	3.760	7.422	5.873

* $P < 0.001$

Таблиця 2. Вплив імітованої мікрогравітації на вміст вуглеводів у 30-денних міні-бульбах картоплі

Вуглеводи	Період вирощування міні-бульб					
	контроль			клиностат		
	травень	червень	жовтень	травень	червень	жовтень
Моносахариди та дисахариди, %						
сухої маси,	4.78±0.11	5.01±0.24	4.79±0.27	4.05±0.24	3.20±0.16	3.87±0.22
сирої маси	1.49±0.04	1.54±0.07	0.73±0.08	1.11±0.06	0.89±0.05	0.88±0.04
Крохмаль, %						
сухої маси	55.18±1.70	57.27±1.09	68.36±2.07	46.46±1.74	70.93±1.49	78.85±1.56
сирої маси	17.26±0.53	17.69±0.34	11.53±0.42	12.78±0.48	19.95±0.54	18.21±0.30

цей показник був суттєво вищим $-70.90\pm1.49\%$.

Протилежний процес відбувався в акумулюванні низькомолекулярних нез'язаних у полімерах моно- та дисахаридів, які є субстратами синтезу крохмалю: з віком міні-бульб за обох режимів вирощування їхній вміст зменшувався. Цей процес активніше відбувався в умовах імітованої мікрогравітації, і на 30-ту добу за цих умов бульби містили лише $3.20\pm0.16\%$ моно- і дисахаридів порівняно з $5.01\pm0.24\%$ в контролі (табл. 1). Ця тенденція підтверджується також даними щодо суттєвого зростання з віком міні-бульб відношення вмісту крохмалю до кількості моно- і дисахаридів. Якщо на 10-ту добу цей показник становив 7.89 в контролі та 8.66 за умов імітованої мікрогравітації, то на 30-ту добу різниця між варіантами зросла майже вдвічі: 22.16 при клиностатуванні та 11.43 в контролі.

Результати аналізів бульб 30-денного віку, вирощених при клиностатуванні в період від травня до жовтня, свідчили про зменшення їхньої сухої маси

з 27.50 до 22.49 %. В умовах стаціонару зменшення сухої маси бульб було суттєвішим — з 31.29 до 17.06 %. Аналогічні дані одержані при порівняння бульб 10-денного віку, вирощених в квітні та у вересні. Ці бульби навесні характеризувались вищим рівнем сухої маси порівняно з початком осені. У бульбах 30-денного віку за обох режимів вирощування відкладання крохмалю в сухій масі інтенсифікувалось восени, проте при клиностатуванні цей процес починається раніше і був активнішим (табл. 2).

Паралельно в міні-бульбах, вирощених за умов імітованої мікрогравітації протягом 10 діб та 30 діб, досліджувалась активність фосфорилази — ферменту обміну запасних полісахаридів. Результати біохімічного аналізу фосфорилазної активності свідчать про те, що за обох режимів культивування з віком бульб вона достовірно зростала, що забезпечувало синтез та констатоване в даних дослідах зростання пулу крохмалю. Слід зазначити, що під час формування бульб в режимі імітованої мікро-

Таблиця 3. Вплив імітованої мікрогравітації на активність фосфорилази у міні-бульбах картоплі

Показники	Вік міні-бульб картоплі, доби			
	10		30	
	контроль	клиностатування	контроль	клиностатування
Маса однієї міні-бульби, мг:				
Суха	1.72±0.31	1.58±0.15	6.52±1.09	4.47±0.52
Сира	7.61±1.76	7.42±0.55	21.94±4.72	15.88±2.03
Суха маса, %	20.16	21.21	22.40	28.18
Вода, %	79.84	78.79	77.56	71.82
Активність фосфорилази: мкМ	4.129±0.171	5.290±0.227*	6.651±0.359*	9.372±0.260*
P/g сухої маси/ хв мкМ	0.830±0.036	1.121±0.048*	1.498±0.078*	2.664±0.073*
P/g сирої маси/ хв мг білку	0.158±0.008	0.168±0.008	0.065±0.003*	0.113±0.004*
Білок, мг/г				
Сухої маси	26.30±1.91	31.45±0.36	104.60±0.80	83.50±3.83*
Сирої маси	5.29±0.39	6.67±0.07***	23.20±1.20	23.50±0.89

* — $P < 0.001$; ** — $P < 0.01$; *** — $P < 0.05$

гравітації активність фосфорилази була вищою, ніж в контролі. Так, на 10-ту добу в умовах клиностатування цей фермент каталізував звільнення 5.290 ± 0.227 мкМ фосфору за 1 хв з ефіру Корі на 1 г сухої маси, в той час як аналогічний показник в умовах контролю складав 4.129 ± 0.171 мкМ. На 30-ту добу ця різниця стала більшою: 9.372 ± 0.260 та 6.651 ± 0.359 мкМ відповідно, що свідчило про інтенсифікацію в цих умовах процесу синтезу та відкладання в бульбах крохмалю (табл. 3).

Відомо, що фосфорилаза є у клітинах різних організмів у вигляді великої кількості молекулярних форм, що є сумішшю субодиниць, що кодуються різними генами. Показано також, що фосфорилаза, виділена з картоплі, є димером і не асоціює на мономери. Висунуто припущення, що фосфорилазам рослин не властиві складні шляхи регуляції на рівні четвертинної структури, як характерні ферментам тваринних тканин [8].

При дослідженні міні-бульб картоплі показано, що електрофоретичний спектр фосфорилази характеризується невисокою гетерогенністю. В екстрактах виявлено дві ізофосфорилази, які різняться за місцем знаходження на фореграмах, а отже за молекулярною масою білку і його зарядом: малорухливу ($R_f 0.14$), і анодну меншої молекулярної маси ($R_f 0.36$), в якій була сконцентрована максимальна фосфорилазна активність. Гістохімічний аналіз природи продуктів фосфорилазної реакції засвідчив наявність інтенсивного темносинього забарвлення реактивом J-KJ цих множинних молекулярних форм фосфорилази. Це вказувало, по-перше, на те, що в даних ділянках спектру була сконцентрована фосфорилазна активність синтетичної спрямованості, в результаті чого відбулось суттєве збільшення кількості лінійної фракції запасного поліглюкану — амілози. Вірогідно, це відбувається шляхом перенен-

сення глюкозидного залишку з глюкозо-1-фосфату в напрямку молекул затравки вуглеводної природи, заполімеризованої в гель. По-друге, згідно з гістохімічним аналізом з віком бульб активність фосфорилази цих форм зонах зростала і суттєво переважала в умовах імітованої мікрогравітації.

Біохімічні дослідження активності фосфорилази і електрофоретичний аналіз її множинних молекулярних форм міні-бульб картоплі, сформованих в умовах імітації мікрогравітації, свідчили про те, що цей режим вирощування сприяв інтенсивнішому відкладанню крохмалю у бульбах як енергетичного резерву клітин.

Крохмаль, який нагромаджується в листках у процесі фотосинтезу, може швидко перетворюватись в дисахариди. Останні є найважливішою транспортною формою, у вигляді якої вуглеводи перетікають з листка у бульби, де знову використовуються у процесі синтезу крохмалю. Отримані результати вказують на стимуляторний вплив імітованої мікрогравітації на процес використання низькомолекулярних моно- і дисахаридів для синтезу та наступного відкладання крохмалю в запасальних органах картоплі.

ВИСНОВКИ

У процесі формування міні-бульб картоплі (*Solanum tuberosum* L.) сорту Адрета до 30-ї доби показано поступове зростання вмісту крохмалю переважно в умовах імітованої мікрогравітації порівняно з стаціонарним контролем. З віком міні бульб при обох режимах зменшувався вміст моно- та дисахаридів, які є субстратами синтезу крохмалю.

Встановлена тенденція до активнішого накопи-

чення запасних поліглюканів при культивуванні міні-бульб в умовах клиностатування в осінній період. Протилежна закономірність спостерігається при аналізі низькомолекулярних вуглеводів, вміст яких восени зменшується.

Показана електрофоретична гетерогенність фосфорилази, яка у процесі формування міні-бульб мала синтетичну спрямованість. Ізоензими фосфорилази мають здатність синтезувати з глюкозо-1-фосфату при наявності затравки лінійний поліглюкан амілозу. Виявлено дві ізофосфорилази: мало-рухливу (R_f 0.14) і анодну (R_f 0.36). З віком бульб інтенсивність фосфорилазної активності цих зон зростала і суттєво переважала в умовах імітованої мікрогравітації.

Біохімічні дослідження активності фосфорилази поряд з гістохімічним аналізом її ізоформ вказують на зростання фосфорилазної активності біомаси міні-бульб у процесі їхнього формування та відкладання крохмалю з переважанням в умовах клиностатування. Встановлена пряма залежність між рівнем активності фосфорилази та кількістю крохмалю в бульбах.

Отримані результати вказують на стимуляторний вплив імітованої мікрогравітації на процес використання низькомолекулярних моно- і дисахаридів для синтезу та наступного відкладання крохмалю в запасальних органах картоплі.

1. Болотова В. І., Саканян Е. І., Лесиовская Е. Е. и др. Спектрофотометрический метод определения содержания полисахаридов в листьях *Tilia cordata* Mill // Растительные ресурсы.—2001.—37, вып. 3.—С. 109—112.
2. Вульфсон П. А., Алексахина Н. В. Структура и функция фосфорилазы // Структура и функция ферментов. — М.:

Наука, 1972.—С. 60—82.

3. Ермаков А. И., Арасимович В. В., Ярош Н. П. и др. Методы биохимического исследования растений / Под ред. А. И. Ермакова: 3-е изд. — Л.: Агропромиздат, 1987.—430 с.
4. Родионов В. С., Холопцева Н. П. Определение фосфолипидов листьев растений с помощью двумерной хроматографии в тонких слоях силикогеля // Физиология и биохимия культурных растений.—1974.—6, № 2.—С. 67—87.
5. Gerbrandy S. J., Verleur J. D. Phosphorylase isoenzymes: localization and occurrence in different plant organs in relation to starch metabolism // Phytochemistry.—1971.—10, N 2.—P. 261—266.
6. Kordyum E. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // Int. Rev. Cytol.—1997.—171.—P. 1—78.
7. Kordyum E., Baranenko V., Nedukha O., Samoilov V. Development of potato minitubers in microgravity // Plant Cell Physiol.—1997.—38.—P. 1111—1117.
8. Lowry O. H., Rosenbrough N. J., Farr A. L., Randall R. I. Protein measurement with the Folin phenol reagent // J. Biol. Chem.—1951.—193, N 1.—P. 265—275.
9. Nedukha O. M., Schnyukova E. I., Leach J. E. High phosphorylase activity is corrected with increased potato minituber formation and starch content during extended clinorotation // Adv. Space Res.—2003.—31, N 10.—P. 2245—2251.

THE INFLUENCE OF SIMULATED MICROGRAVITY ON THE FORMATION OF STORAGE POLYSACCHARIDES OF POTATO MINITUBERS

Ye. I. Shniukova, O. M. Nedukha

A simulated microgravity influenced essentially the metabolism of storage polysaccharides of the potato minitubers. An increase of synthesis and accumulation of starch and an enhancement of phosphorylase activity were observed in the minitubers during a long-term clinorotation. At the same time the mono- and disaccharides content decreased, which pointed to the intensification of their utilization for starch synthesis. The correlation between the enhancement of enzyme activity and the increase of starch content is revealed.

ЮБИЛЕЙ ПРОМЕТЕЯ
К 85-летию со дня рождения члена-корреспондента АН УССР
Николая Федоровича Герасюта

Неумолимо быстро течет время. В тумане прошедших десятилетий забывается и стирается из памяти людей многое, даже казавшееся когда-то важным и значительным. Как ни печально, забываются имена и дела большинства ушедших из жизни наших собратьев... Но в пепле ушедших лет все же останутся сиять на долгие годы бриллиантами высшей огранки отдельные имена людей, успевших за время своей короткой человеческой жизни совершить то, что остается с людьми навсегда, служит их благу. Одной из таких ярких личностей, с которой нам посчастливилось вместе работать, был Николай Федорович Герасюта — воин, ученый, один из пионеров ракетно-космической техники в нашей стране, Человек с большой буквы, которому в этом году 18 декабря исполнилось бы 85 лет.

Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент АН УССР Герасюта внес настолько значительный вклад в становление и развитие РКТ, что его, без преувеличения, можно считать создателем украинской школы баллистиков, динамиков. И мы, его ученики и коллеги, еще долгие годы будем с большой теплотой иуважением вспоминать этого незаурядного специалиста и руководителя.

Николай Федорович родился 18 декабря 1919 года в городе Александрии Кировоградской области. После окончания средней школы он поступил на механико-математический факультет Одесского госуниверситета, который окончил в июне 1941 г. Сразу со студенческой скамьи Николай Федорович попадает на фронт сапером. Младший лейтенант Герасюта сразу понял и «зарубил себе на носу»: сапер-минер может ошибиться только один раз — другого раза не будет... Поэтому своей будущей жене Лизе он говорил перед уходом на задание: «Не волнуйся. Я не могу быть ранен. Я либо буду жив, либо меня не будет. Но я буду, жди!» И он действительно ни разу не ошибся и за всю войну ни разу не был ранен. Сапером-минером он прошел от Сталинграда до Берлина. Возводил переправы на Днепре, на Висле и на Одере. Закончил войну капитаном, начальником штаба особого саперного батальона при штабе знаменитой 62-й (сталинградской), а впоследствии 8-й Гвардейской армии В. И. Чуйкова. Радисткой у Василия Ивановича была совсем юная Лиза, в будущем Елизавета Ильинична

Герасюта (в Сталинграде ей было всего 17 лет).

Ратные подвиги Николая Федоровича отмечены рядом боевых наград: орденами Красной Звезды и Отечественной войны 2-й степени, медалями «За оборону Сталинграда», «За отвагу» (он ею особенно дорожил), «За освобождение Варшавы», «За взятие Берлина», «За победу над Германией».

Сразу после окончания войны Николая Федоровича направляют в распоряжение С. П. Королева, которому было поручено изъятие трофейной ракетной техники и соответствующей документации на заводах и КБ Вернера фон Брауна. С этой целью под руководством Сергея Павловича в нашей оккупационной зоне Германии был создан институт «Нордхаузен».

С 1947 г. Н. Ф. Герасюта работает в подмосковных Подлипках в созданном при НИИ-88 ОКБ-1 под руководством С. П. Королева. Основным направлением его инженерной и научной деятельности стала динамика полета баллистических ракет. Здесь он в содружестве с первопроходцами-ракетостроителями Р. Ф. Аппазовым, А. Г. Пилютиком, В. П. Мишиным, С. С. Лавровым закладывает первые камни в фундамент инженерной баллистики БРДД. В соавторстве с А. Г. Пилютиком он издает первую книгу по устойчивости движения БРДД. В 1951 г. Николай Федорович успешно защищает кандидатскую диссертацию, и его, вместе с группой других ведущих специалистов ОКБ-1, направляют в Днепропетровск в СКБ автозавода, который был переориентирован с автостроения на РКТ. Наш завод начинал тогда выпускать первые королевские ракеты 8А11, 8Ж38 и 8К51 (Р-1, Р-2, Р-5).

В 1954 г. на базе заводского СКБ, которым руководил Василий Сергеевич Будник (в настоящее время академик НАНУ Главный научный сотрудник ИПМ НАНУ, было создано Особое конструкторское бюро №586 во главе с бывшим заместителем Королева, а впоследствии директором НИИ-88 Михаилом Кузьмичом Янгелем, которое стало родоначальником нового направления в ракетостроении, а именно: создания боевых БРДД на высококипящих компонентах топлива. Немалый вклад в разработку вопросов баллистики и динамики этих ракет внес и начальник сектора баллистики, первый кандидат наук на нашем предприятии Николай

Федорович Герасюта. При его непосредственном участии в 1956—1961 гг. были спроектированы и успешно прошли летные испытания первые ракеты на высококипящих компонентах: 8К63, 8К65, 8К64 (Р-12, Р-14, Р-16).

Естественно, что Н. Ф. Герасюта стал и одним из организаторов и первым преподавателем в созданном при Днепропетровском госуниверситете Физико-техническом факультете, который одним из первых в Союзе начал выпускать специалистов по ракетной технике.

В 1958 г. Н. Ф. Герасюта назначается начальником вновь созданного расчетно-теоретического отдела в составе пяти секторов:

- сектора баллистики боевых и космических ракет,
- сектора динамики головных частей и ИСЗ,
- сектора заправки и энергетики,
- сектора динамики и управления,
- сектора вычислительной техники.

В 1961 г. он становится заместителем Главного конструктора по вопросам баллистики, динамики переходных процессов, управляемости и точности ракет, курирования смежных организаций-разработчиков системы управления, полностью отвечающим за энерго-баллистические характеристики со-здаваемых ракет и баллистическое обеспечение пусков этих ракет (расчет полетных заданий). Его большой вклад в становление КБ как мощного научно-конструкторского головного предприятия, а также в создание БРДД первого поколения высоко оценен Государством: ему присуждается ученая степень доктора технических наук, в 1959 г. он награждается орденом Ленина, а в 1961 г. ему присваивается звание Героя Социалистического Труда и вручается второй орден Ленина. В последующие годы он был награжден орденом Октябрьской Революции (1982 г.), ему были присвоены почетные звания лауреата Государственной (1967) и Ленинской (1972) премий.

19 сентября 1962 года приказом М. К. Янгеля на базе отдела Герасюты был создан расчетно-теоретический комплекс, который должен был обеспечивать научными исследованиями и расчетными работами все этапы создания новых боевых и космических ракет, а именно: проектные разработки, выпуск конструкторской документации, экспериментальную наземную отработку, летные испытания и последующую эксплуатацию ракетно-космической техники. В комплекс первоначально вошли:

— отдел баллистики, динамики движения ГЧ в атмосфере и динамики переходных процессов, то есть динамики старта, разделения ступеней, сброса отработавших элементов конструкции и отделения

полезного груза,

— отдел анализа управляемости ракет и кучности стрельбы, курирующий смежные организации-разработчики системы управления,

— отдел вычислительной техники, анализа отделения и динамики движения средств преодоления ПРО противника, курирующий смежные организации-разработчики таких средств.

Позднее в состав комплекса вошли также отдел аэрогазодинамики и отдел тепломассообмена.

В 1962 году Высшая аттестационная комиссия СССР присваивает Николаю Федоровичу ученое звание профессора, а Ученый Совет ДГУ избирает его заведующим профилирующей кафедрой. Он становится членом специализированного Ученого Совета ДГУ, а впоследствии и Ученого совета КБЮ. Подготовке инженерных и научных кадров он придавал первостепенное значение: на протяжении всех лет работы в университете, где им был разработан фундаментальный курс лекций по динамике и управлению БРДД, он постоянно руководил дипломным проектированием студентов и научной работой аспирантов. Им подготовлены четыре доктора и 30 кандидатов наук. В соавторстве с профессором МАИ А. А. Лебедевым им написана монография «Баллистика ракет», которая стала настольной книгой не только студентов и аспирантов ракетных специальностей, но и молодых специалистов и ученых в проектно-конструкторских и испытательных организациях промышленности и Министерства обороны.

Н. Ф. Герасюта придавал всегда большое значение сотрудничеству специалистов КБЮ и смежных проектных организаций с соответствующими организациями Министерства обороны. Он лично участвовал в проведении летных испытаний практически всех ракет, созданных в КБЮ. Был он на стартовой площадке полигона Байконур и в тот страшный день 24 октября 1960 г., когда при подготовке первого пуска ракеты 8К64 произошла известная всем трагедия, унесшая жизнь почти 100 человек. Николай Федорович вместе с Михаилом Кузьмичом за минуту до взрыва отошел от ракеты на перекур. Это обоим им спасло жизнь... Авторитет Герасюты среди военных специалистов и высшего командного состава особенно таких ведущих организаций, как ГУРВО, НИИ-4, ЦНИИП в Капустином Яре и НИИП-5 в Тюра-Таме (теперь космодром Байконур), был непререкаем.

Николай Федорович автор или соавтор большого количества научных статей и изобретений. В частности, он является соавтором такого пионерского изобретения, как изобретение первой в мире разделяющейся головной части, оснащенной нескольки-

ми (до десяти) боевыми блоками с индивидуальным наведением по различным целям.

С именем Н. Ф. Герасюты связано становление и совершенствование организационной структуры КБЮ. К нему в полной мере применимо понятие «ученый-организатор науки». Каждое подразделение в комплексе Герасюты становится научным направлением, что дает основание говорить о научной школе Герасюты. Его коллективу не приходилось искать научные проблемы для разработки, их рождала сама жизнь. Вот основные научно-технические проблемы, решенные по его инициативе или под его руководством и при его личном участии.

- Разработаны и реализованы на всех этапах создания ракетных комплексов подходы, методы и технологии по максимальному использованию энергетических возможностей ракет, разработаны принципиально новые способы заправки ракет с высококипящими компонентами топлива, в которых учитываются формулярные характеристики систем и агрегатов ракет.
- Были предложены и реализованы на первой в мире боевой орбитальной ракете 8К69 слабоэллиптические траектории и комплект программ тандема для их реализации. Это позволило при ограниченной энергетике ракеты выполнить ТТТ МО в части обеспечения пусков ракет в прямом и обратном (с облетом вокруг Земли) направлениях во всем круговом диапазоне азимутов стрельбы. Решение этой проблемы привело к тому, что вся система ПРО США и Канады, размещенная в северных широтах, оказалась неэффективной для защиты их территории с южной стороны. В результате американцы вынуждены были начать переговоры о разоружении и запрещении ПРО.
- Методология исследования проблем динамики боевых блоков при движении в атмосфере на исходящем участке траектории. Им лично определен состав и обоснована необходимость учета возмущающих факторов при оценке работоспособности боевых блоков, включающей определение условий срабатывания систем автоматики заряда, запасов прочности, температурных режимов и тепломассообмена.
- Методы решения задач баллистики для ракет с разделяющимися головными частями и терминальной системой управления, а именно: оптимальное (с точки зрения энергетики) разведение блоков по различным целям, оперативный расчет полетных заданий, анализ движения управляемых на атмосферном участке блоков, спецматобеспечение задач планирования пус-

ков в высших звеньях управления («баллистический фильтр»).

- Весь комплекс методологических вопросов, связанных с энерго-баллистическим проектированием боевых ракет и ракет-носителей космических аппаратов, а также баллистическим обеспечением пусков ракет как в части расчета полетных заданий, так и решения сложных организационных вопросов по выбору трасс стрельбы и районов падения отделяющихся частей ракет, включая акватории Тихого океана.
- Исследование динамики таких пионерских видов старта, как старт БРДД из шахтных пусковых установок по направляющим и со свободным выходом из шахты (комплексы «Двина», «Чусовая», «Шексна»), а также минометный старт тяжелых жидкостных ракет (15А14, 15А18) из шахты и минометный старт твердотопливных БРДД из пусковых установок боевого железнодорожного комплекса (БЖРК). Экспериментальная и натурная отработка этих процессов.
- Динамическое проектирование систем разделения ступеней ракет тандемной компоновки, в том числе впервые в мире схем горячего и минометного разделения. Экспериментальная отработка этих процессов.
- Динамика выброса и программного распределения в пространстве средств противодействия противоракетной обороне (операции «Верба», «Кактус», «Крот»). Создание первого отечественного комплекса противодействия ПРО, принятого на вооружение в составе ракеты 8К67. В последующем Герасюта был заместителем председателя всех Государственных комиссий по натурным испытаниям аналогичных комплексов.
- Динамика отделения боевых блоков первых в мире разделяющихся головных частей, в том числе инерционным способом при работающем маршевом двигателе ракеты, а также с помощью рычажных механизмов трехъярусной РГЧ 15Ф143 ракеты 15А14.
- Методология исследования проблем динамики боевых блоков при движении в атмосфере. Им лично определен состав и обоснована необходимость учета возмущающих факторов при оценке работоспособности боевых блоков, включающей определение условий срабатывания систем автоматики заряда, запасов прочности, температурных режимов и тепломассообмена. Особо следует отметить его роль в организации исследований динамики движения ББ на атмосферном участке траектории с «несанкционирован-

ным» прекращением его стабилизации, условно названным «антидемпфированием». Для решения этой проблемы по инициативе Николая Федоровича были привлечены лучшие научные силы из многих научных организаций Советского Союза. Разработанные при личном участии Герасюта алгоритмы, учитывающие это явление, в дальнейшем использовались при разработке всех боевых блоков.

- Теплообмен и теплозащита крупногабаритных маршевых РДТТ, оптимизация средств термостатирования и обеспечения тепловых режимов ракет-носителей на криогенном топливе. Разработка и внедрение в практику ракетостроения высокоеффективных многофункциональных материалов для малогабаритных скоростных блоков, позволивших существенно повысить точность стрельбы.
- Исследование аэрогазодинамики минометного старта и минометного разделения ступеней, а также газодинамического воздействия факела двигателей ракеты на стартовое оборудование, отделяющиеся ступени и боевые блоки и космические аппараты при их отделении от ступени разведения.
- Создание базы вычислительной техники в КБЮ. При этом Николай Федорович внедрил в практику использования современной вычислительной техники основополагающие, как он считал, нетрадиционные подходы, а именно: какой бы совершенной ни была ЭВМ — ей надо доверять, но обязательно проверять, т. е. за всеми полученными результатами расчетов чувствовать и понимать физику явления. Отсюда вытекала принципиальная позиция Герасюта: не должно быть «чистых» программистов, программы расчетов должны разрабатываться самими инженерами или совместно с программистами-профессионалами. Он был против создания в КБЮ самостоятельного вычислительного центра, в который можно было бы дать заявку на расчет и получить готовый результат (так было поставлено дело в большинстве родственных предприятий). У нас был открыт доступ к ЭЦВМ самим инженерам-пользователям. Это впоследствии способствовало быстрому внедрению в практику работы всех отделов предприятия персональной вычислительной техники.

Говоря о Герасюте как о руководителе и организаторе научных исследований, следует отметить его умелый подход не только к воспитанию кадров, но и к их расстановке. Он смело выдвигал на руково-

дящие должности молодых перспективных инженеров. Так, например, только что перешагнувшего 30-летний рубеж А. А. Красовского Герасюта выдвинул в 1961 г. на должность начальника отдела баллистики и переходных процессов. Молодому специалисту Ю. П. Панкратову еще не исполнилось 28 лет, когда он в 1963 г. доверили ему руководство самым большим сектором, который вел баллистическое проектирование двух первых межконтинентальных ракет нового поколения 8К67 и 8К69, динамическое проектирование всех переходных процессов и обеспечение полетными заданиями пусков упомянутых ракет. Следует отметить, что на 90 % коллектив комплекса Герасюты в начале 1960-х гг. состоял из комсомольцев в возрасте до 28 лет.

Хотелось бы еще коротко остановиться на роли Н. Ф. Герасюты в создании в Днепропетровске научного центра по проблемам механики. Начиная с 1965 г. он целеустремленно проводит работу в руководящих структурах АН Украины, направленную на создание в нашем городе академического сектора по фундаментальным проблемам, связанным с развитием РКТ. Он заручается поддержкой руководства КБЮ, обкома партии и ряда ведущих киевских ученых, и его начинание завершается полным успехом: Постановлением Президиума АН УССР № 99 от 14.04.66 в Днепропетровске создается сектор проблем технической механики в составе четырех научных отделов. Этим же Постановлением Н. Ф. Герасюта назначается руководителем СПТМ на общественных началах. Под руководством Н. Ф. Герасюты сектор быстро развивается: сюда привлечены известные ученые В. И. Моссаковский, В. М. Ковтуненко, В. А. Лазарян, а также большое количество талантливой молодежи из КБЮ (Г. Л. Мадатов, В. И. Пилипенко, В. А. Задонцев и др.). Основными направлениями исследований СПТМ стали: динамика ракетных двигателей и систем их питания, динамика движения ракет и КА, аэродинамика КА при входе в атмосферу, теория и методы определения надежности конструкции летательных аппаратов. Большая и результативная работа Герасюты на этом поприще получила одобрение и поддержку широкой научной общественности Украины: научные планы СПТМ на 1968 г. Николай Федорович утверждал уже в звании члена-корреспондента АН УССР.

Следует отметить, что на протяжении всей своей трудовой деятельности он активно участвовал в общественной и партийной работе: избирался членом партийного бюро, членом секции Комитета по Госпремиям Украины, был членом Ученых Советов ДГУ и КБЮ.

Николай Федорович был не только высокоэрудированным инженером и ученым, но и отличным семьянином. С большой теплотой и любовью вспоминает о нем его боевая подруга и жена Елизавета Ипатьевна. Документ о регистрации брака им выдал командир части в апреле 1945 г. сразу после форсирования Одера. А впереди еще предстоял штурм Берлина... Они воспитали сына и дочь, которые окончили университет и долгое время работали в КБЮ. Герасюта любил и хорошо знал литературу, любил рыбалку и гитару. Он не только хорошо играл на многих музыкальных инструментах, но и хорошо пел и умел рассказать анекдот «по-одесски». В общем, умел повеселиться и развеселить компанию.

Большое значение Герасюта придавал и взаимоотношениям сотрудников комплекса между собой. Он всегда старался погасить возникавшие между подчиненными конфликтные ситуации по-хорошему: либо шуткой, либо уместным к ситуации анекдотом. Но если по-хорошему не получалось, он был категоричен. Так, например, конфликтовавшие между собой два уважаемых начальника сектора кандидаты наук долгое время не могли найти взаимопонимание по организационно-техническому вопросу и поодиночке пришли к Герасюте жаловаться друг на друга. Тогда Николай Федорович пригласил их обоих к себе и сказал так: «В связи с тем, что вы не хотите найти взаимопонимание и тем самым срываете сроки выполнения работ, я обоих лишаю премии. А если в течение недели вы

не найдете общий язык, вы оба будете понижены в должности». В результате конфликт был исчерпан и проблема решена в течение двух дней.

Таков, если говорить вкратце, жизненный и творческий путь большого ученого, талантливого инженера и руководителя. Таким навсегда остался в памяти наш старший друг, товарищ и учитель Николай Федорович Герасюта. Его жизненный путь оборвался в 1987 году, но факел, зажженный им на ракетно-космическом Олимпе, с успехом несут его ученики и последователи, освещая им путь новым поколениям ракетчиков.

Генеральный конструктор
Государственного конструкторского бюро
«Южное» им. М. К. Янгеля,
доктор технических наук,
академик НАН Украины
С. Н. КОНЮХОВ

Начальник расчетно-теоретического комплекса
Государственного конструкторского бюро
«Южное» им. М. К. Янгеля,
А. М. ПОДОЛИННЫЙ

Ведущий научный сотрудник
Государственного конструкторского бюро
«Южное» им. М. К. Янгеля,
кандидат технических наук, доцент
Ю. П. ПАНКРАТОВ

НАШІ АВТОРИ

АБЛАМЕЙКО Сергій Володимирович — член-кореспондент, Генеральний директор Об'єднаного інституту проблем інформатики Національної академії наук Білорусі, професор. Заступник голови Національної ради з космосу, лауреат Державної премії Республіки Білорусь.

АБУРДЖАНІЯ Георгій Дуруйович — завідувач лабораторії Інституту прикладної математики (ПМ) Тбіліського державного університету ім. Джавахішвілі, завідувач Управління науки і технології Космічного агентства Грузії, професор Тбіліського державного університету, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика плазми, геофізика, фізика атмосфери, іоносфери, магнітосфери, нелінійна динаміка хвильових структур.

АГАПІТОВ Олексій Володимирович — асистент кафедри астрономії і фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук

Напрям науки — геліофізика та фізика Сонячної системи.

АДАМЧУК-ЧАЛА Надія Іванівна — науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — клітинна біологія.

АНДРЄЄВА Ольга Анатоліївна — молодший науковий співробітник лабораторії Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія».

Напрямок науки — фізика Сонця.

АЛЕКСЄЄВ Ю. С. — Державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод», м. Дніпропетровськ

АРТЕМЕНКО Ольга Анатоліївна — молодший науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України.

Напрям науки — молекулярна біологія.

БАНДУРИСТИЙ Леонід Максимович — директор Спеціального проектного конструкторського бюро «Дискрет» Одеського національного технічного університету, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічне приладобудування.

БАРАБАНОВ Микола Олексійович — завідувач відділу Спеціального проектного конструкторського бюро «Дискрет» Одеського національного технічного університету.

Напрям науки — космічне приладобудування.

БАХМУТОВ Володимир Георгійович — заступник директора Інституту геофізики Національної академії наук України ім. С. І. Субботіна, доктор геологічних наук.

Напрям науки — геомагнітне поле та клімат Землі.

БЕЗРУКИХ Владилен Володимирович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук (м. Москва), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика космічної плазми.

БОРОДІНОВА Тетяна Іванівна — провідний інженер Інституту біоколоїдної хімії Національної академії наук України (Київ),

Напрям науки — фізика колоїдів.

БУРМАКА Віктор Петрович — молодший науковий співробітник Інституту юносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

Напрям науки — некогерентне розсіювання радіохвиль, хвильові процеси в іоносфері.

БУШУЄВ Євген Іванович — заступник директора Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук.

Напрям науки — системне проектування космічних систем спостереження Землі. Обробка даних дистанційного зондування Землі.

ВАСИЛЬЄВА Т. В. — співробітник Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — системне проектування пілотованих космічних польотів, машинобудування.

ВЕНЕДИКТОВ Юрій Іванович — заступник директора Спеціального проектного конструкторського бюро «Дискрет» Одеського національного технічного університету, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічне приладобудування.

НАШІ АВТОРИ

ВІДЬМАЧЕНКО Анатолій Петрович — завідувач відділу Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика планет.

ВОЗНЮК Тамара Миколаївна — провідний інженер Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — мікробіологія.

ВОЛОВИК Ольга Гнатівна — старший науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук, Лауреат Державної премії України.

Напрям науки — космічна біологія.

ВОЛОХ Костянтин Пилипович — начальник відділу Національного космічного агентства України.

Напрям науки — автоматизована обробка вимірюваної інформації, математичне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем, системи та комплекси навігаційного забезпечення.

ВОЛОШИН В'ячеслав Іванович — директор Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрям науки — розробка апаратно-програмних засобів для планування роботи і оперативного керування космічною системою, обробка даних дистанційного зондування Землі.

ВОЛОЩУК Олена Михайлівна — співробітник Інституту урології АМН України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — мікробіологія, мікологія.

ГАБДУЛЛІН Флюр Фатхлісламович — головний спеціаліст лабораторії Федерального державного унітарного підприємства «Центральний науково-дослідний інститут машинобудування» Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — взаємодія плазми з елементами космічних апаратів.

ГАВРИЛОВ Роланд Володимирович — директор Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Вєркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — кріогенна та вакуумна техніка.

ГАМАЛЕЯ Микола Федорович — завідувач відділу Інституту експериментальної патології, онкології та радіобіології Національної академії наук України ім. Р. Є Кавецького, професор, доктор біологічних наук, Лауреат Державної премії України.

Напрям науки — експериментальна онкологія, фотобіологія.

ГДАЛЕВИЧ Геннадій Лазарович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук (м. Москва), доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика космічної плазми.

ГЛУЩЕНКО А. М. — Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Дунаївці.

ГОЛОВІНКІН А. В. — співробітник Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — системне проектування пілотованих космічних польотів, машинобудування.

ГОПАСЮК Ольга Степанівна — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця.

ГОПАСЮК Степан Ілліч — головний науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця.

ГОРОБЕЦЬ Оксана Борисівна — молодший науковий співробітник Інституту експериментальної патології, онкології та радіобіології Національної академії наук України ім. Р. Є Кавецького.

Напрям науки — фотомедицина.

ДОВГАЛЬ Сергій Григорович — завідувач сектору Спеціального проектного конструкторського бюро «Дискрет» Одеського національного технічного університету.

Напрям науки — космічне приладобудування.

НАШІ АВТОРИ

ДРАНОВСЬКИЙ Володимир Йосипович — Головний конструктор та начальник Конструкторського бюро космічних апаратів та систем Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля (м. Дніпропетровськ), член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор. Лауреат Державної премії СРСР, Лауреат Державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України, Заслужений машинобудівник України.

Напрям науки — динаміка, балістика та керування рухом літальних апаратів.

ЕСТРЕЛА-ЛЬОПІС Вікторіо Рафаелович — провідний науковий співробітник Інституту біоколоїдної хімії Національної академії наук України (Київ),

Напрям науки — біоколоїдна хімія.

ЄПІШЕВ Віталій Петрович — науковий керівник лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент.

Напрям науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометрических спостережень ШСЗ.

ЄРЕМЕНКО Віктор Валентинович — директор Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, академік.

Напрям науки — фізика низьких температур.

ЖОВНОВАТА Валентина Леонтіївна — провідний інженер Інституту мікробіології та вірусології Національної академії наук України.

Напрям науки — вірусологія.

ЗАСТЕНКЕР Георгій Наумович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук (Москва), доктор фізико-математичних наук, нагороджений медаллю Федерації космонавтики ім. Ю. О. Гагаріна.

ЗБРУЦЬКИЙ Олександр Васильович — завідувач кафедри, декан факультету авіаційних та космічних систем Національного технічного університету України (КПІ), доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — авіаційні та космічні системи.

ЗЄЛИК Ярема Ігорович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — теорія та процеси управління, системний аналіз, оброблення сигналів, сонячно-земна фізика.

ІВАНОВ Юрій Стратонович — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — наукове приладобудування, розробка оптических приладів.

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, професор, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

ІСАК Іван Іванович — науковий співробітник лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрям науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометрических спостережень ШСЗ.

КАБЛАК Наталія Іванівна — доцент Ужгородського національного університету, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — дослідження впливу атмосфери на спостереження ШСЗ.

КАБЛАК Уляна Іванівна — аспірант Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрям науки — астрометрія.

КАПУСТИН Євген Іванович — перший заступник директора Державного підприємства «Дніпро-космос».

Напрям науки — дистанційне зондування Землі та систематизація космічної інформації.

КАРАБАДЖАК Георгій Февзійович — заступник начальника відділу Федерального державного унітарного підприємства «Центральний науково-дослідний інститут машинобудування» Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — дослідження високотемпературних газів та плазми методами оптичної діагностики.

НАШІ АВТОРИ

КИЗЬЮРОВ Юрій Веніамінович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України Напрям науки: фізика космічної плазми, фізика іоносфери.

КИРИЛОВ Олексій Іванович — головний конструктор проекту Державного підприємства «Дніпро-космос».

Напрям науки — програми керування корисним навантаженням космічних систем дистанційного зондування Землі.

КИСЛОВ Олександр Матвійович — начальник сектору Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — математичне моделювання фізичних процесів і технічних систем, теплофізики.

КЛІМИК Володимир Улянович — науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрям науки — автоматизація математичної обробки результатів спостережень ШСЗ

КОВАЛЬ Елеонора Захарівна — провідний науковий співробітник Інституту урології АМН України, доктор біологічних наук, професор.

Напрям науки — мікологія, мікодеструкція промислових матеріалів.

КОВАЛЬЧУК Марія Вікторівна — молодший науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України,

Напрям науки — мікробіологія.

КОЗАК Людмила Володимирівна — асистент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

КОЗЕКО Людмила Євгенівна — старший науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — фізіологія рослин.

КОЗИРОВСЬКА Наталія Олексіївна — старший науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

КОМАРОВ Валерій Георгійович — перший заступник Генерального директора Національного космічного агентства України.

Напрям науки — організація космічної діяльності.

КОРНІЙЧУК Олександр Станіславович — провідний інженер Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — фізіологія рослин.

КОНЮХОВ Станіслав Миколайович — генеральний конструктор Державного конструкторського бюро «Південне», академік Національної академії наук України.

Напрям науки — ракетно-космічна техніка.

КОПИЛОВА Юлія Геннадіївна — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії РАН, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми.

КОРДЮМ Віталій Арнольдович — завідувач відділу Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, академік.

Напрям науки — космічна біологія.

КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович — заступник директора, завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки України. Керівник напряму «Новітні технології» Державної програми досліджень в Антарктиці. Член редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія» та «Українського антарктичного журналу». Нагороджений відзнакою Президента України — орденом «За заслуги» III ступеня.

Напрям науки — електромагнітні дослідження, космічне приладобудування.

КОРОТКОВ А. С. — Державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод», м. Дніпропетровськ.

НАШІ АВТОРИ

КОШКІН М. І. — Державне конструкторське бюро «Південне», м. Дніпропетровськ.

КОРСУН Anatolij Grigorovych — начальник сектору Федерального державного унітарного підприємства «Центральний науково-дослідний інститут машинобудування» Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).
Напрям науки — взаємодія плазми з елементами космічних апаратів.

КОРЧИНСЬКИЙ Володимир Михайлович — завідувач кафедри електронних засобів телекомуникацій, професор Дніпропетровського національного університету, доктор технічних наук.
Напрям науки — автоматизоване оброблення та розпізнавання зображень, цифрові системи телекомуникацій.

КРАВЦОВ Аркадій Анатолійович — завідувач відділу Об'єднаного інституту проблем інформатики Національної академії наук Білорусі, вчений секретар Національної ради з космосу, виконавчий директор білорусько-російських космічних програм, кандидат технічних наук.

КРАВЦОВ Сергій Леонідович — старший науковий співробітник Об'єднаного інституту проблем інформатики Національної академії наук Білорусі, кандидат технічних наук.
Напрям науки — дистанційне зондування Землі.

КРУКОВСЬКА Олена Володимира — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук.
Напрям науки — програмування, математична статистика.

КРЮЧКОВ Євген Іванович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.
Напрям науки — точна гравіметрія та магнітometрія.

КУЗІН Сергій Павлович — старший науковий співробітник Інституту астрономії РАН, кандидат технічних наук.
Напрям науки — космічна геодезія і геодинаміка.

КУПРЯНОВА Олена Геннадіївна — молодший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії РАН.

Напрям науки — астрофізика і радіоастрономія.

ЛАДІКОВ-РОЄВ Юрій Павлович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.
Напрям науки — гідродинаміка, магнітна гідродинаміка, системний аналіз.

ЛАКУТИНА Олена Вікторівна — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук.
Напрям науки — мікропроцесорна техніка, програмування.

ЛЕВЕНКО Олександр Сергійович — провідний інженер Державного підприємства «Дніпрокосмос», член Спілки журналістів України, випускний редактор екологічного журналу Днепропетровської міської ради «Екополіс».

Напрям науки — безпека життєдіяльності регіонів, моніторинг природно-техногенних процесів аерокосмічними методами, аналіз ракетно-космічної діяльності.

ЛЕНОВА Людмила Йосипівна — старший науковий співробітник Інституту урології АМН України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — мікробіологія, проблеми життезабезпечення у космічному кораблі.

ЛИННИК Андрій Олександрович — інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика Сонця.

ЛИСЕНКО Валерій Миколайович — заступник директора з наукової роботи Інституту юносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — експериментальні дослідження юносфери радіофізичними методами

ЛІТВІНЕНКО Тетяна Леонтіївна — провідний інженер Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України,

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

НАШІ АВТОРИ

ЛІЗУНОВ Георгій В'ячеславович — старший науковий співробітник асистент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук. Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

ЛОБАНОВ Вадим Федорович — науковий співробітник Кримської лазерної обсерваторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — лазерна локація штучних супутників Землі, системотехніка.

ЛОГІНОВ Олексій Олексійович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізична кібернетика, електродинаміка суцільних середовищ.

ЛОМІНАДЗЕ Джумбер Георгійович — засновник і голова Космічного агентства Грузії, академік АН Грузії, академік-секретар Відділення математики і фізики АН Грузії, професор Тбіліського державного університету ім. Джавахішвілі. З 1992 по 2000 р. — директор Абастуманської астрофізичної обсерваторії АН Грузії, зараз керівник Центру плазмової астрофізики ААО, протягом 5 років був головою Центрвиборчому Грузії. Лауреат Державної премії Грузії з науки і техніки, член Міжнародного астрономічного союзу і Американського фізичного товариства. Нагороджений Орденом Горгасалі.

Напрям науки — фізика плазми та керований термоядерний синтез, теоретична астрофізика, пульсири та акреційні диски.

ЛУКЕНЮК Адольф Антонович — заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — системи збору та обробки наукової інформації з космічних апаратів.

ЛУК'ЯЩЕНКО В. І. — заступник генерального директора Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія), доктор технічних наук.

Напрям науки — системні дослідження в галузі ракетно-космічної техніки, розробка програм досліджень.

ЛУЦЕНКО В. Н. — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук.

Напрям науки — мікропроцесорна техніка, програмування.

МАРЧЕНКО Віктор Тимофійович — начальник відділу Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрям науки — системний аналіз дистанційного зондування Землі.

МАСЛОВА Наталя Василівна — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — моделювання космічних процесів.

МАХОНІН Євген Іванович — начальник управління Національного космічного агентства України. Лауреат державної премії України.

Напрям науки — ефективна експлуатація космічних засобів і систем, радіотехнічні комплекси.

МАШКОВСЬКА Світлана Петрівна — науковий співробітник Ботанічного саду Національної академії наук України.

Напрям науки — ботаніка.

МАЩЕНКО Олександр Миколайович — перший заступник генерального конструктора-генерального директора Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля (м. Дніпропетровськ).

Напрям науки — проектування та конструкція літальних апаратів.

МЕЛЕНЕВСЬКИЙ Юрій Олександрович — начальник відділу Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Напрям науки — фізика і техніка низьких температур, оптико-електронне приладобудування.

МЕЛЬНИК Галина Володимирівна — аспірант Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна.

Напрям науки — геофізика.

МЕНЬШИКОВ Валерій Олександрович — директор Науково-дослідного інституту космічних систем — філія Державного космічного науково-виробничого центру ім. М. В. Хрунічева, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки Російської Федерації.

НАШІ АВТОРИ

МИТРОХИН Олександр Володимирович — доцент Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
Напрям науки — геологія.

МІНІН Олег Олександрович — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія».
Напрям науки — лазерна локація штучних супутників Землі.

МІЩЕНКО Іван Анатолійович — студент Національного аграрного університету.
Напрям науки — екологія, біотехнології, екологічний менеджмент, космічна біологія.

МІЩЕНКО Лідія Трохимівна — старший науковий співробітник біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор біологічних наук.
Напрям науки — космічна біологія, космічна фіто-вірусологія, віруси рослин.

МОЗГОВА Тамара Олексіївна — молодший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України.
Напрям науки — геофізика.

МОРОЖЕНКО Олександр Васильович — професор, доктор фізико-математичних наук.
Напрям науки — фізика планет.

МОТРУНИЧ Іван Іванович — старший науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету, кандидат фізико-математичних наук.
Напрям науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометричних спостережень ШСЗ.

НЕВОДОВСЬКИЙ Євген Петрович — інженер I категорії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.
Напрям науки — наукове приладобудування.

НЕВОДОВСЬКИЙ Петро Вікторович — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.
Напрям науки — наукове приладобудування.

НЕГОДА Олександр Олексійович — генеральний директор Національного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук.
Напрям науки — системний аналіз і теорія оптимальних рішень.

НЕДУХА Олена Макарівна — провідний науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, доктор біологічних наук.
Напрям науки — цитологія.

НОВАК Ельвіра Йосипівна — науковий співробітник лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.
Напрям науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометричних спостережень ШСЗ.

НОСАЧ Лідія Миколаївна — старший науковий співробітник Інституту мікробіології та вірусології Національної академії наук України.
Напрям науки — вірусологія.

ОРЄШКІНА Лариса Владиславівна — науковий співробітник Об'єднаного інституту проблем інформатики Національної академії наук Білорусі.
Напрям науки — дистанційне зондування Землі.

ПАНАСЕНКО Сергій Валентинович — інженер кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.
Напрям науки — радіофізичні дослідження нижньої іоносфери, динаміка мезосфери.

ПАНКРАТОВ А. Ю. — Інформаційне агентство «АПК-Інформ», Дніпропетровськ

ПАРНОВСЬКИЙ Олексій Сергійович — аспірант, співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.
Напрям науки — матеріалознавство, гідродинаміка, числові методи, астрофізика.

ПАРШИНА Ольга Іванівна — головний програміст Державного підприємства «Дніпрокосмос».
Напрям науки — обробка даних дистанційного зондування Землі.

НАШІ АВТОРИ

ПЕРЕМЕТЧИК Н. Н. — Управління з екології Дніпропетровської міської Ради, Дніпропетровськ.

ПОВНИЦЯ Ольга Юріївна — старший науковий співробітник Інституту мікробіології та вірусології Національної академії наук України.
Напрям науки — вірусологія.

ПОПОВА Антоніна Федорівна, старший науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, доктор біологічних наук.

Напрям науки — клітинна та гравітаційна біологія.

ПРОНІН Володимир Вікторович — начальник відділу Державного підприємства «Дніпрокосмос». Напрям науки — дистанційне зондування Землі.

ПУШКАРСЬКИЙ Сергій Васильович — заступник директора, старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту космічних систем — філіал Державного космічного науково-виробничого центру ім. М. В. Хрунічева, кандидат технічних наук.

РАПОПОРТ Юрій Григорович — докторант фізичного факультету КНУ, старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика навколоzemного космічного простору.

РОГУЦЬКИЙ Іван Станіславович — науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук України,
Напрям науки — фізика твердого тіла.

РОМАНЕНКО Володимир Григорович — провідний математик Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — математичне моделювання фізичних процесів і технічних систем, теплофізика.

РУДЕНКО Адель Вікторівна — завідувачка лабораторії Інституту урології АМН України, доктор біологічних наук, професор.
Напрям науки — клінічна мікробіологія, мікологія.

САВЕЛЬЄВ Юрій Васильович — заступник директора, завідувач відділу Інституту хімії високомолекулярних сполук Національної академії наук України, доктор хімічних наук.

Напрям науки — хімія високомолекулярних сполук.

САЛЬNIKOV Mикола Mиколайович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — гідродинаміка, системний аналіз.

СЕЛІВАНОВ Юрій Олександрович — завідувач лабораторії Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — теоретична фізика, обчислювальна фізика.

СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович — інженер Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — наукове приладобудування, розробка оптичних пристрій.

СИТНИК Сергій Костянтинович — старший науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — космічна біологія.

СОКОЛОВ В. А. — Державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод», м. Дніпропетровськ.

СОСОНКІН Михайло Григорович — завідувач лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — наукове приладобудування, атмосферна оптика.

СТЕПАНОВ Олександр Володимирович — директор Головної астрономічної обсерваторії РАН, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми, радіоастрономія.

СТЕПАНЯН Наталія Миколаївна — завідувач лабораторії Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика Сонця.

НАШІ АВТОРИ

СУВОРОВ В. В. — заступник начальника Науково-технічного центру Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — розробка програм дослідень, системне проектування пілотованих космічних польотів.

ТАРАН Віталій Іванович — директор Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Премії Ради Міністрів СРСР (1989 р.).

Напрям науки — метод некогерентного розсіювання, високопотенціальні радари некогерентного розсіювання, фізика іоносфери у збудженному стані.

ТАТЕВЯН Сурія Керімовна — завідувачка відділу космічної геодезії Інституту астрономії РАН, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — космічна геодезія і геодинаміка.

ТВЕРДОХЛЄБОВА Катерина Михайлівна — начальник лабораторії Федерального державного унітарного підприємства « Центральний науково-дослідний інститут машинобудування» Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — взаємодія плазми з елементами космічних апаратів.

ТОПЧІЙ Наталя Миколаївна — аспірант Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України.

Напрям науки — космічна біологія.

ТОРОП Валентина Василівна — провідний інженер лабораторії екології та діагностики вірусних захворювань біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізіологія рослин, біофізика, фітовірусологія, екологія, космічна біологія.

ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери та іоносфери.

ФЕДОРОВ Олег Павлович — начальник управління космічних програм наукових досліджень Національного космічного агентства України, завідувач лабораторії Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — матеріалознавство, космічні дослідження.

ФЕДЯКІН Олександр Іванович — старший науковий співробітник, завідувач відділу ефективності технічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрям науки — дослідження технічної і економічної ефективності складних систем.

ФІДЕЛІС Віктор Володимирович — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрофізика високих енергій.

ФОЇНГ Бернард Г. — головний науковець Європейського космічного агентства, виконавчий директор міжнародної робочої групи з дослідження Місяця (Нідерланди, Нордвік).

Напрям науки — космічна техніка.

ХАНТАДЗЕ Арчил Георгійович — завідувач кафедри Тбіліського державного університету ім. Джавахішвілі, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — геофізика, фізика атмосфери, іоносфери, магнітосфери, магнітна гідродинаміка.

ХАРШИЛАДЗЕ Олег Автандилович — доцент Тбіліського державного університету ім. Джавахішвілі, заступник голови Космічного агентства Грузії, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — розповсюдження електромагнітних хвиль, фізика плазми, іоносфера, нелінійна динаміка хвильових структур.

ЦАП Юрій Теодорович — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти і науки України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми, радіоастрономія.

НАШІ АВТОРИ

ЦЕРКОВНИЙ Олександр Ілліч — начальник сектору Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Вєркіна Національної академії наук України.

Напрям науки — оптико-електронне приладобудування.

ЦИМБАЛЮК Михайло Михайлович — начальник лабораторії Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія), кандидат технічних наук.

Напрям науки — машинобудування.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика плазми, теоретична фізика.

ЧЕРНЯК Юрій Вікторович — науковий співробітник Інституту юносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — експериментальні дослідження юносфери радіофізичними методами.

ЧЕСАЛІН Лев Сергійович — завідувач відділу Інституту космічних досліджень Російської академії наук (Москва), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика і мікропроцесорна техніка.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — космічна фізика, космічна радіофізика, космічна екологія та космічна погода.

ШВАЛАГІН Ірена Василівна — старший науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрометрія.

ШЕВИРЄВ Микола Миколайович — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук.

Напрям науки — фізика Сонця, сонячно-земні зв'язки, магнітосфера.

ШИШКО Євгенія Денисівна — старший науковий співробітник Інституту експериментальної патології, онкології та радіобіології Національної академії наук України ім. Р. Є Кавецького, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — фотобіологія.

ШНЮКОВА Єлизавета Іллівна — старший науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біохімія.

ЩЕГОЛЬ В. А. — Державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод», м. Дніпропетровськ

ЯКУБОВСЬКИЙ Володимир Петрович — провідний інженер Кримської лазерної обсерваторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — лазерна локація штучних супутників Землі, системотехніка.

ЯРЕМЕНКО Лариса Миколаївна — старший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — геофізика.