

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 12, № 5/6, 2006

KYIV

ЗМІСТ

Демченко А. В., Зевако В. С., Кулабухов А. М., Майданюк Д. В., Манойленко А. А., Хуторний В. В. Первый украинский молодежный спутник

Лялько В. І., Шпортиuk З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільногого індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS

Волошин В. І., Корчинський В. М. Повышение информаціонности видовых данных дистанционного зондирования Земли

Волошин В. И., Бушуев Е. И., Паршина О. И. Разработка методики классификации покровных элементов ландшафта

CONTENTS

- 4 Demchenko A. V., Zevako V. S., Kulabukhov A. M., Maidanuk D. V., Manoilenco A. A., Khutorny V. V. First Ukrainian youth's satellite
- 10 Lyalko V. I., Shportyuk Z. M., Sakhatskyi O. L., Sybirtseva O. M. Land cover classification in Ukrainian Carpathians using the MERIS terrestrial chlorophyl index and red edge position from ENVISAT MERIS data
- 15 Voloshin V. I., Korchinski V. M. Increase of information significance of Earth's remote sensing specific data
- 18 Voloshyn V. I., Bushuyev Ye. I., Parshyna O. I. Development of a technique for classification of integumentary elements of a landscape

Запевалов А. С., Показеев К. В., Пустовойтенко В. В. О соотношении зеркальной и брэгговской составляющих при рассеянии радиоволн квазигауссовой морской поверхностью

Демків О. Т., Кордюм Е. Л., Хоркавців Я. Д., Таїрбеков М. Г. Умови мікрогравітації — експериментальна база для пізнання закономірностей морфогенезу рослин в гравітаційному полі

Zaets I., Voznyuk T., Kovalchuk M., Rogutskyy I., Lukashov D., Mytrokhyn O., Mashkovska S., Foing B., Kozyrovska N. Optimization of plant mineral nutrition under growth-limiting conditions in a lunar greenhouse

Тарадий В. К., Годунова В. Г., Карпов Н. В., Сергеев А. В., Сосонкин М. Г., Барабанов С. И. Контроль потенциально опасных объектов и техногенного загрязнения атмосферы и ближнего космоса на обсерватории Терскол

Вольвач А. Е., Румянцев В. В., Молотов И. Е., Сошилина А. С., Титенко В. В., Агадзе Р. И., Шильдкнехт Т., Бирюков В. В., Ибрагимов М. А., Маршалкина А. Л., Власюк В. В., Юрьишева О. В., Стрепка И. Д., Коноваленко А. А., Туккарі Дж. Исследования фрагментов космического мусора в геостационарной области

Ляшенко М. В., Пуляев В. А., Черногор Л. Ф. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности

Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период магнитной бури 7—11 ноября 2004 г., обусловленные утренним солнечным терминатором

Mishra Rajesh K., Mishra Rekha Agarwal Interplanetary transients causing unusual anisotropic wave trains in CR intensity

Чернолевський М. С. Критична швидкість перенесення атомів рухомою дислокацією

Член-кореспондент НАН України Вадим Іванович Лялько (до 75-річного ювілею)

НАШІ АВТОРИ

АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК

НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ

ХРОНІКА

23 *Zapevalov A. S., Pokazeev K. V., Pustovoytenko V. V.* On ratio between the specular and Bragg components scattered by the quasi-Gaussian sea surface

30 *Demkiv O. T., Kordyum Ye. L., Khorkavtsiv Ya. D., Tairbekov M. G.* Microgravity is the experimental basis for understanding of the peculiarities of plant morphogenesis in the gravitational field

36 *Засіць І. Є., Вознюк Т. М., Ковальчук М. В., Рогуцький І. С., Лукашов Д. В., Митрохін О. В., Mashkovska C. П., Фойнг Б. Г., Козировська Н. О.* Оптимізація мінерального живлення рослин в несприятливих умовах вирощування у місячній оранжереї

42 *Tarady V. K., Godunova V. G., Karpov N. V., Sergeev A. V., Sosonkin M. G., Barabanov S. I.* Monitoring of neos and technogenic pollution of the atmosphere and outer space at the Terskol Peak Observatory

50 *Volvach A. E., Rumjantsev V. V., Molotov I. E., Sochilina A. S., Titenko V. V., Agapov V. M., Kiladze P. I., Schildknecht T., Biryukov V. V., Ibragimov M. A., Marshalkina A. L., Vlasuk V. V., Yurishcheva O. V., Strepka I. D., Konovalenko A. A., Tuccari G.* Researches of space debris fragments over the geostationary area

58 *Lyashenko M. V., Pulyaev V. A., Chernogor L. F.* Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters during rise solar activity period

69 *Gokov A. M., Tyrnov O. F.* Electron density variations in the ionospheric D-region at mid-latitudes during magnetic storm on 7—11 November 2004, conditioned by morning solar terminator

79 *Miura Radjevi K., Miura Reha Agarwal* Міжпланетні переміщення, що викликають незвичайні анізотропні хвильові пакети в інтенсивності космічних променів

87 *Chernolevskii M. S.* Critical velocity for atom transfer by moving dislocation

91 The seventy-fifth anniversary of Corresponding Member of N.A.S. of Ukraine V. I. Lyalko

94 OUR AUTHORS

99 INDEX

104 NEWS FROM SPACE AGENCIES

109 NEWS

УДК 629.78

А. В. Демченко¹, В. С. Зевако², А. М. Кулабухов³,
Д. В. Майданюк³, А. А. Манойленко³, В. В. Хоторный²

¹Інститут технічної механіки НАН України і НКА України, Дніпропетровськ

²Національний центр аерокосмічної освіти молоді України, Дніпропетровськ

³Дніпропетровський національний університет

Перший український молодежний супутник

Надійшла до редакції 22.11.05

Рассматриваются вопросы создания первого украинского молодежного спутника УМС-1: компоновка полезной нагрузки, ее согласование со служебными системами, принцип функционирования в штатном режиме, а также состояние и перспективы разработки.

В ряде стран активно разрабатываются молодежные и студенческие микроспутники, основные задачи которых — подготовка квалифицированных кадров, отработка новых идей и технологий с относительно невысокими затратами, что вызывает интерес космических фирм и военных ведомств [1]. Украина, одна из крупнейших космических держав, поставляет на рынок космических услуг современные ракеты-носители и осуществляет запуски космических аппаратов. Общегосударственной (национальной) космической программой Украины предусмотрено выполнение проекта «Освіта-КА», основная цель которого — создание и запуск украинского молодежного спутника. Выполнение работ по это-

му проекту НКАУ поручило Национальному центру аэрокосмического образования Украины (НЦАОУ).

Для широкого привлечения молодежи в 2004 г. был объявлен конкурс проектов по созданию украинского молодежного спутника. Из числа победителей конкурса пяти проектов были рекомендованы для интегрирования в состав УМС-1. С целью уменьшения трудоемкости и сроков создания УМС-1 предполагается использование материальной части унифицированной платформы МС-1 микроспутника МС-1-ТК (разработчик ГКБ «Южное»).

В формировании окончательного состава полезной нагрузки КА УМС-1 и выработке пред-

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АМ — абонентский модуль	ОК — оптический комплекс
ПН — аппаратура полезной нагрузки	ПМ — периферийный модуль
БСТИ — блок сбора телеметрической информации	СИРЛ — специальная информационная радиолиния
БЦВК — бортовой цифровой вычислительный комплекс	СКТРЛ — совмещенная командно-телеметрическая радиолиния
КНУ — Киевский национальный университет им. Т. Шевченко	ССНИ — система сбора научной информации
КПА — контрольно-проверочная аппаратура	СУ — система управления
ЛЦ ИКИ — Львовский центр Института космических исследований	СЭС — система электроснабжения платформы
НЦАОУ — Национальный центр аэрокосмического образования молодежи Украины	УМС-1 — украинский молодежный спутник
НЦУИКС — Национальный центр управления и испытаний космических средств	ФТФ ДНУ — Физико-технический факультет Днепропетровского национального университета
	ЦПОСИ — центр приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля

ложений по комплексу УМС-1 приняли участие молодежные творческие коллективы Киевского национального университета им. Тараса Шевченко (КНУ), Физико-технического факультета Днепропетровского национального университета (ФТФ ДНУ), Львовского центра ИКИ (ЛЦ ИКИ).

Основные задачи, решаемые с использованием КА УМС-1:

- изучение пространственного распределения ионосферных эмиссий;
- исследование и мониторинг состояния участков суши и водной поверхности;
- создание научно-образовательных программ по проектированию, изготовлению и эксплуатации УМС-1 с использованием полученной телеметрической и научной информации;
- создание интерактивных базисных мультимедийных курсов, лабораторных работ и специальных практикумов.

В соответствии с назначением определен состав комплекса УМС-1, который включает космический и наземный сегменты. В качестве ракеты-носителя (РН) планируется использование РН «Днепр» или «Циклон-4». Управление КА УМС-1, прием и обработку телеметрической информации о состоянии бортовой аппаратуры предполагается обеспечить средствами Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУИКС). Прием научной информации с УМС-1 предполагается вести средствами Центра приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля (ЦПОСИ) и абонентского модуля (АМ). Включение в состав наземного сегмента абонентского модуля обусловлено необходимостью отработки относительно недорогих (около 140 тыс. грн) систем программного слежения за КА. Абонентский модуль предполагается использовать в образовательных программах ведущих вузов Украины для приема научной информации и создания элементов сети двухсторонней передачи информации.

В состав КА УМС-1, общий вид которого приведен на рис. 1, входят унифицированная платформа микроспутника МС-1-ТК (ГКБ «Южное») и аппаратура полезной нагрузки (НЦАОМУ).

В состав аппаратуры полезной нагрузки



Рис. 1. Общий вид КА УМС-1

(АПН), обеспечивающей выполнение целевых задач, входят:

- оптический комплекс (ОК) (измерение ионосферных возмущений);
- система сбора научной информации (ССНИ) (прием, хранение, преобразование информации от ОК, и ее передача на Землю во время сеансов связи через специальную информационную радиолинию).

Разработку и создание оптического комплекса проводит молодежный авторский коллектив Киевского национального университета, работы по компоновке аппаратуры полезной нагрузки и обеспечению ее функционирования в составе УМС-1 выполняет Физико-технический факультет Днепропетровского национального университета, разработку и создание системы сбора научной информации выполняет Львовский центр Института космических исследований. Создание абонентского модуля, а также его

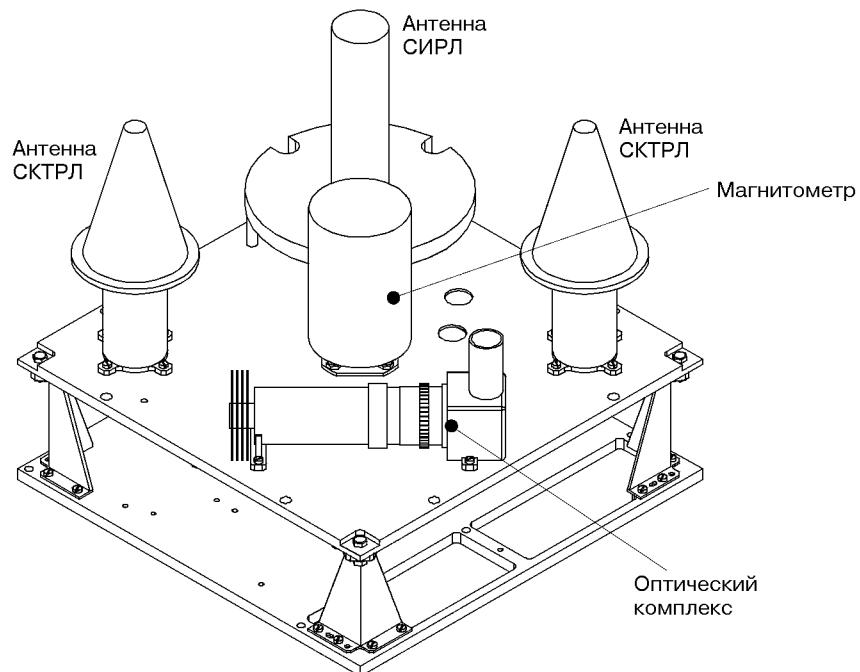


Рис. 2. Расположение аппаратуры полезной нагрузки КА УМС-1

последующую эксплуатацию предполагается вести авторскому коллективу Физико-технического факультета Днепропетровского национального университета.

При создании УМС-1 предполагается обеспечить минимальное внесение изменений в конструкцию платформы, электрические связи, алгоритмическое и информационное обеспечение.

Оптический комплекс состоит из оптико-механического блока, предназначенного для проведения измерений и электронного блока. Оптико-механический блок ОК устанавливается на нижней платформе МС-1 (рис. 2). Оптическая ось ОК совпадает с продольной осью КА, что позволяет осуществлять съемку поверхности Земли.

Система сбора научной информации размещается в рамочном модуле тех же геометрических размеров, что и блок телекамеры микроспутника МС-1-ТК и устанавливается на его посадочные места. В рамочном модуле размещен электронный блок ОК, что обеспечивает его непосредственное соединение с ССНИ. Электронный блок ОК соединяется с оптико-механическим блоком кабелем.

Прочностные расчеты, проведенные авторским коллективом Физико-технического факультета Днепропетровского национального университета при консультативной поддержке специалистов ГКБ «Южное», показали возможность такой компоновки аппаратуры полезной нагрузки на базовой платформе.

Предварительные расчеты показали возможность обеспечения срока активного существования, равного одному году, с вероятностью не ниже 0.8. Следует отметить, что такая надежность бортового обеспечивающего комплекса базовой платформы не является критичной, так как фактические значения вероятности безотказной работы аппаратуры полезной нагрузки, особенно электронных блоков ОК и ССНИ, могут оказаться ниже. Это обусловлено наличием в их составе элементов, надежность которых в условиях космоса изучена недостаточно. Для подтверждения надежности этой аппаратуры предполагается проведение автономной экспериментальной отработки. Кроме того, для повышения надежности аппаратуры ССНИ, как ключевой в составе АПН, предполагается резервирование основных ее блоков.

Основные параметры КА УМС-1

Масса	≤ 70 кг
Габариты	
в запакованном виде	430×430×963 мм
в рабочем положении	1240×1240×3945 мм
Срок активного существования	> 1 года
Виды стабилизации	Гравитационная, электромагнитная
Погрешность стабилизации по углам тангенса, рыскания, вращения	$\leq 3^\circ$
Площадь солнечных батарей	1 м ²
Выходная среднесуточная мощность солнечных батарей	≥ 18 Вт
в том числе потребляемая АПН	3 Вт
Выходное напряжение электроснабжения	
нестабилизированный выход	24—34 В
стабилизированный выход	+5; +12; -12; +15; -15 В
Скорость передачи информации:	
по телеметрическому каналу связи	256 Кбит/с
по информационному каналу связи	192 Кбит/с
Максимальная длительность сеансов связи в сутки	30 мин
Количество сеансов связи за сутки	≤ 4
Длительность одного сеанса связи	≤ 15 мин
Объем оперативной памяти ССНИ	> 1 Гбайт

Основные характеристики КА УМС-1 приведены в таблице.

Интеграция АПН в состав унифицированной платформы потребовала согласования соответствующих электрических характеристик. В результате проведенных работ было установлено, что потребляемая мощность АПН (ОК — 7 Вт, ССНИ — 4.5 Вт) превышает гарантированные возможности системы электроснабжения платформы (СЭС). После проведенных дополнительных исследований, связанных с расположением солнечных батарей относительно Солнца, были найдены временные участки, на которых возможно проведение научных экспериментов с использованием ОК и последующей передачей научной информации по каналу специальной информационной радиолинии (СИРЛ) на Землю (рис. 3). Такие участки могут быть определены на Земле расчетным путем. Интервалы работы АПН определяются условием $P_{\text{СЭС}} \geq P_{\text{OK}}$, где $P_{\text{СЭС}}$ — выходная мощность СЭС, P_{OK} — среднесуточная потребляемая мощность ОК со всеми системами УМС-1. Это позволяет по командам с Земли включать АПН на расчетное время и

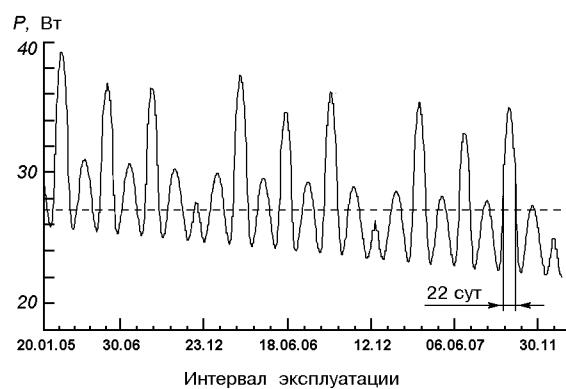


Рис. 3. Характер изменения среднесуточной мощности $P_{\text{СЭС}}$ солнечных батарей в зависимости от положения КА на орбите и времени эксплуатации; пунктир — мощность P_{OK} , потребляемая ОК

обеспечивать выполнение КА своих функций.

Для питания АПН принято решение использовать нестабилизированное напряжение. Вызвано это в первую очередь появлением интегральных схем стабилизаторов напряжения с КПД $\approx 80\%$, и низкими энергетическими характеристиками имеющихся на платформе стабилизированных каналов питания. предусмотрено снятие нестабилизированного напряжения питания с АПН при превышении токопотребления в 1.5 раза.

Функционирование на базовой платформе ОК и ССНИ потребовало анализа возможности использования имеющихся на борту команд для управления. Показано, что для управления АПН можно использовать восемь команд, выполняющих разовые или программные функции.

Между ССНИ и бортовым цифровым вычислительным комплексом (БЦВК) предусмотрен режим передачи 6 байт информации в последовательном коде, который используется один раз за сеанс работы АПН. Эта информация используется для обеспечения режимов работы как ССНИ, так и ОК (изменение режимов работы, выставка диафрагмы и т. д.).

Телеметрические измерения на КА УМС-1 осуществляются с целью контроля функционирования бортовых систем КА, определения состояния узлов, устройств и комплектов аппаратуры после выведения КА на орбиту и в процессе его штатной работы.

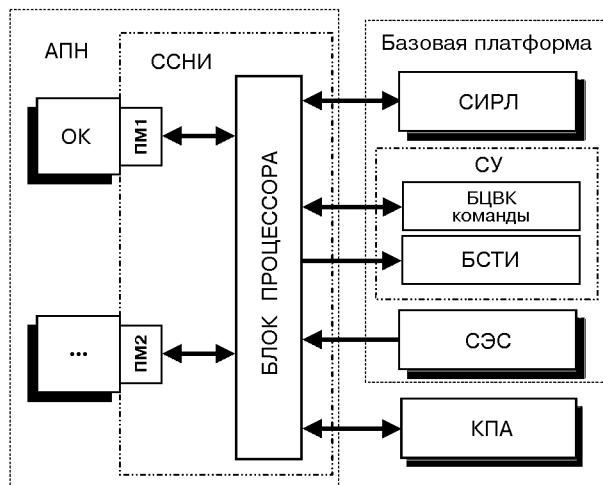


Рис. 4. Функциональная схема УМС-1

Телеметрический контроль КА УМС-1 осуществляется с помощью БЦВК и блока сбора телеметрической информации (БСТИ), входящих в состав системы управления (СУ) платформы.

Система сбора научной информации осуществляет съем информации с ОК и передачу этой информации во время сеансов связи через СИРЛ на Землю. Через ССНИ осуществляется обмен информацией с БЦВК (сеансная настройка АПН).

Предварительные проработки по интеграции АПН показали целесообразность выделения ССНИ в отдельный унифицированный модуль. Предложен новый подход, при котором ССНИ принимается центральной среди АПН, и подключение к бортовым системам платформы осуществляется через ССНИ (рис. 4). Такой подход упрощает согласование АПН с платформой в случаях замены АПН новыми приборами. Периферийные модули (ПМ) ССНИ использованы для согласования выходов АПН с блоком процессора, и соединяются через унифицированный интерфейс.

Для обеспечения контроля функционирования АПН при наземных испытаниях на ССНИ предусмотрен специальный разъем, к которому подключается контрольно-проверочная аппаратура (КПА).

В типовые сутки полета СУ и СЭС функционируют непрерывно. Совмещенная командно-телеметрическая радиолиния (СКТРЛ) и СИРЛ

включаются в режим сеанса связи командами СУ на видимых витках (два-три раза в сутки продолжительностью до 15 мин каждое включение). При этом два сеанса работы СКТРЛ (основной и резервный) планируются для записи в память БЦВК программных команд на следующие сутки полета. Управление СКТРЛ и СИРЛ осуществляется командами, формируемыми СУ в процессе отработки командно-программной информации.

Оптический комплекс включается командами СУ с длительностью разового включения от 20 до 40 мин на виток в зависимости от освещенности (дневные и ночные участки). Количество включений в сутки определяется условием обеспечения энергетического баланса и максимальным отведенным в ССНИ объемом информации, обеспечивающим сброс этой информации через СИРЛ на Землю в сеансах связи не более чем за двое суток.

Программа функционирования УМС-1 формируется в НЦУИКС на основе поданных заявок потребителей и передается на борт КА по СКТРЛ. Прием научной информации от АПН осуществляется по СИРЛ абонентским модулем и средствами ЦПОСИ.

Таким образом, при создании УМС-1 реализованы следующие принципы:

- максимальное использование конструкции и служебных систем платформы микроспутника МС-1-ТК;
- минимальное внесение изменений в электрические связи и алгоритмическое обеспечение БЦВК;
- объем научной информации, принимаемый от полезной нагрузки (ОК, УФП) при однократном включении в ССНИ, не должен превышать объема информации, которую можно передать с УМС-1 в сеансах связи через СИРЛ за время не более 2 сут;
- управление аппаратурой ОК, ССНИ и снятие телеметрической информации осуществляется с использованием СКТРЛ.

Молодежными авторскими коллективами подготовлены проекты технического задания и технического предложения, сетевой график создания и запуска КА УМС-1, а также технические задания на разработку составных частей АПН и АМ. В соответствии с сетевым графиком разработаны разделы эскизного проекта, в подготовке

которых активное участие приняли студенты ФТФ ДНУ в рамках курсового и дипломного проектирования.

Работы, проведенные в период 2004—2005 гг., свидетельствуют о возможности создания и запуска КА УМС-1 в 2007 г. при условии обеспечения необходимым финансированием.

1. Бояркин Г. Н., Трушляков В. И., Шалай В. В. и др. Создание учебно-исследовательского орбитального стенда на основеnano- и микроспутников и последних ступеней ракет-носителей // Полет.—2004.—№ 2.— С. 42—49.
2. Демченко А. В., Лапидус Б. Г. Создание украинского молодежного спутника // Аэрокосмический вестник.—2005.—Апрель.—С. 21—23.

3. Космические летательные аппараты. Назначение, структура и основные этапы создания: Учеб. пособ. / Под общ. ред. А. Н. Петренко. — Д.: ГНПП «Системные технологии», 2005.—124 с.

FIRST UKRAINIAN YOUTH'S SATELLITE

*A. V. Demchenko, V. S. Zevako, A. M. Kulabukhov,
D. V. Maidanuk, A. A. Manoilenko, V. V. Khutorny*

Design processes of the first Ukrainian youth's satellite UMS-1 are examined. Payload arrangement, it's coincidence with service systems, operational principle in the regular mode, development status and prospects are considered.

УДК 528.8.04:551.4

В. І. Лялько, З. М. Шпорюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева

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

Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільног індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS

Надійшла до редакції 05.05.06

Наведено результати попередніх досліджень можливості використання даних відеоспектрометра MERIS для класифікації земного покриву Українських Карпат. При дослідженнях використано дані космознімання супутника ENVISAT MERIS від 16.04.2004 р. з грубою просторовою розрізенністю 1200 м, на основі яких для району досліджень обчислено попіксельно величини індексів REP, MTCI та NDVI. Метод мінімальної відстані до середнього застосовано до множин даних цих індексів для класифікації земного покриву. Результати досліджень показали, що зображення ENVISAT MERIS із грубою просторовою розрізенністю забезпечує середній результат класифікації: добре класифікуються лише хвойні ліси та покриті снігом вершини. Класифікація з використанням множин індексів REP та MTCI дає кращі результати, ніж класифікація на основі значень відбиття. Результати досліджень показали добру кореляцію між REP і MTCI та високий потенціал для моніторингу екосистем у гірських районах з використанням комбінації обох індексів.

ВСТУП

Ліси в Українських Карпатах покривають досить великі площини. Поряд із природними лісами значну територію займають ліси, що інтенсивно висаджувалися після 1945 р. Ліси відіграють важливу роль у збереженні екологічної рівноваги. Зміни, які відбуваються в лісах, впливають на кліматичні процеси як на регіональному, так і на глобальному рівні. За останні роки у зв'язку з вирубками лісів у Карпатському регіоні значно загострилися екологічні проблеми. Тому необхідний сталий контроль за станом лісів.

Наші дослідження спрямовані на моніторинг стану лісів дослідженого регіону згідно з тематикою глобального моніторингу довкілля за

ініціативою Європейського космічного агентства (ESA) та Європейської комісії — «Forest changes and global carbon monitoring». Дистанційне зондування є відповідним інструментом для моніторингу величезних площ у важкодоступних гірських районах. Воно може досить ефективно здійснюватись на основі використання даних сучасних супутниковых систем, зокрема відеоспектрометра середнього розрізнення MERIS (the Medium Resolution Imaging Spectrometer). Відеоспектрометр MERIS встановлено на супутнику ENVISAT 1 (запуск 1 березня 2002 р.). Він має 15 каналів із спектральними смугами шириною $\Delta\lambda$ від 2.5 до 20 нм в діапазоні $\lambda\lambda = 390$ —1040 нм та просторову розрізенність 300 м (висока) і 1200 м (груба).Період спосте-

реження території 3 доби. Це робить MERIS потенціально цінним сенсором для спостереження та моніторингу наземного середовища, зокрема стану лісів на регіональному та глобальному рівнях [1, 4]. Наявність п'яти каналів ширину до 10 нм в червоній та близькій ІЧ-зоні дає можливість отримати значення вегетаційних індексів NDVI (the Normalized Difference Vegetation Index), REP (the Red Edge Position) і MTCI (the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) [6], необхідні для оцінювання стану рослинності та її продуктивності.

На основі попіксельного обчислення вегетаційних індексів за даними MERIS можна формувати нові зображення, для аналізу яких можна використовувати ті ж методи класифікації, що і для зображень, побудованих за даними спектрів відбиття.

ДЖЕРЕЛО ДАНИХ ТА МЕТОДИ

Зображення ENVISAT MERIS від 16 квітня 2004 р. із просторовою розрізненістю 1200 м, надане Європейським космічним агентством (ESA) в рамках проекту BEAR, використано при дослідженні покриву Українських Карпат. Специфікації спектральних каналів задані на вебсторінці [<http://envisat.esa.int/dataproducts/meris/CNTR2.htm//eph.meris.prodalg>]. Дані MERIS конвертовано до формату ERDAS Imagine за допомогою програм BEAM та ENVI.

На рис. I (кольорова вклейка) наведено схематичну карту земного покриву Українських Карпат, на якій прямокутником позначено область досліджень. Досліджувана територія обмежена координатами $23^{\circ}20'..24^{\circ}50'$ с.д. та $48^{\circ}00'..49^{\circ}15'$ північної широти. Фрагмент зображення ENVISAT MERIS (комбінація каналів 4, 7 та 14) досліджуваної території наведено на рис. II (кольорова вклейка).

Зображення високої просторової розрізненості 30 м КА «Landsat 7 ETM⁺» від 5 травня 2000 р. використано для зіставлення з даними MERIS. Інвентаризаційні лісотаксаційні дані, структуровані відповідно до типів лісової рослинності та адміністративних площ, використано як наземні завірювальні дані для класифікації земного покриву за космознімками. Інвентаризаційні лісотаксаційні дані включають

інформацію про видовий склад дерев, вік, висоту та ін. для відносно однорідних площ (первинні інвентаризаційні одиниці). Ці дані зібрано в 1996 р., в GIS-форматі нанесено на територію Карпатського національного природного парку (південний захід Івано-Франківської області) і використано в дослідженнях. Кількість первісних інвентаризаційних одиниць на досліджуваному полігоні перевищує сотню. На досліджуваній території переважають однорідні хвойні ліси з перевагою ялини. Соснові і листяні дерева (здебільшого бук та вільха) на деяких ділянках також покривають значну територію. Класифікація супутникових даних здійснювалась з використанням програмних модулів ERDAS Imagine. Метод мінімальної віддалі до середнього використано для класифікації MERIS-даних, тому що деколи площи інтересу покривали заледве 1-2 піксели зображення.

Для класифікації зображення «Landsat ETM⁺» (рис. II, д) використано правило максимальної ймовірності, щоб одержати точніші дані. Надійність класифікації зображення високої розрізненості для головних класів покриву земної поверхні звичайно становить 85—95 % згідно з нашими дослідженнями. Виконано аналіз спектральних яскравостей для класифікації зображення з метою побудови карти розподілу вегетаційних груп. Це дослідження використовує навчання та класифікацію. Результатом процесу навчання була множина сигнатур для вибраних класів. Спектральні характеристики виділених класів лісової рослинності та різних ландшафтів були встановлені з використанням 4—5 тестових ділянок у межах площ кожного класу.

Класифікація наземного покриву за даними ENVISAT MERIS здійснювалась за двома варіантами даних. В одному варіанті для класифікації використано зображення, побудоване за множиною коефіцієнтів відбиття (TOA reflectance) [4], обчислених по-піксельно для даних 15 каналів відеоспектрометра MERIS. У другому варіанті за даними попіксельного обчислення вегетаційних індексів NDVI, REP та MTCI побудовано NDVI-зображення (рис. II, а), REP-зображення (рис. II, б), MTCI-зображення (рис. II, в) та синтезоване тришарове (NDVI, REP, MTCI) зображення (рис. II, г), яке використовувалось для класифікації земного покриву за методом MMDM.

ПОБУДОВА NDVI-, REP- ТА MTCI-ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДАНИМИ ENVISAT MERIS

Обчислення REP. Для оцінки стану рослинного покриву, зокрема для виділення ділянок із здорововою та пригніченою рослинністю за даними дистанційного зондування Землі, разом із значеннями спектральних яскравостей, коефіцієнтів відбиття та вегетаційних індексів використовується і така характеристика, як позиція червоного краю спектрів відбиття (REP). За означенням [7] REP — це довжина хвилі із інтервалу $\lambda = 680—760$ нм, на якій швидкість зміни спектру відбиття досягає максимуму. Значення REP може бути обчислено різними способами: за методом 4-точкової лінійної інтерполяції [3, 6], з використанням методу інтерполяції Лагранжа першої похідної спектру за значеннями його похідних у трьох точках хвильового відрізка, розташованого в області червоного краю [7], або з використанням похідних спектру, апроксимованого лінійною комбінацією степенів поліномів Чебишова [1, 2, 5].

Наведемо формули обчислення REP з умови максимуму першої похідної спектру відбиття, апроксимованого сумою п'яти членів ряду, розвиненого за поліномами Чебишова, і за методом 4-точкової лінійної інтерполяції, модифікованим для даних сенсора MERIS [6]. Апроксимація спектру поліномами Чебишова має вигляд

$$R(\lambda) = C_0 + C_1 T_1(\lambda) + C_2 T_2(\lambda) + C_3 T_3(\lambda) + C_4 T_4(\lambda),$$

де $T_m(t) = \cos[m(\arccost)]$ — поліноми Чебишева першого роду m -го степеня ($|t| \leq 1$; $m \geq 2$; $T_1(t) = t$), $R(\lambda)$ — значення коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ . Коефіцієнти C_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) визначаються за методом найменших квадратів. Тоді REP визначається з умовою $R'(REP) = \max R'(\lambda)$, $670 \leq \lambda \leq 780$ нм, де $R'(\lambda)$ — перша похідна апроксимованого спектру.

Згідно з методом 4-точкової лінійної інтерполяції REP для даних сенсора MERIS, визначається за формулами [7]

$$\begin{aligned} REP &= 708.75 + 45 \frac{\bar{R} - R_9}{R_{10} - R_9} = \\ &= 708.75 + 45 \frac{\bar{R} - R_{708.75}}{R_{753.75} - R_{708.75}}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_7 + R_{12}}{2}.$$

Тут R_i — значення коефіцієнта відбиття в i -му каналі, $i = 7, 9, 10, 12$. Зауважимо, що обчислені різними способами значення REP можуть не збігатися. Тут ми використовуємо значення REP, обчислені методом (1), який є оптимальним щодо часу обчислень [2, 7].

Обчислення MTCI. Одним із нових вегетаційних індексів, які використовують значення коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль із області червоного краю, є запропонований в роботі [6] наземний хлорофільній індекс MTCI. Згідно з означенням MTCI — це відношення різниці коефіцієнтів відбиття R в 10-му і 9-му каналах до різниці коефіцієнтів відбиття в 9-му і 8-му каналах MERIS

$$MTCI = \frac{R_{10} - R_9}{R_9 - R_8}, \quad (2)$$

Показано [6], що у випадку високих значень вмісту хлорофілу в рослинах MTCI чутливіший до його зміни, ніж REP.

Обчислення NDVI. Розпізнавання стану рослинного покриву можна здійснювати за допомогою нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI, який визначається за формулою

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_r}{R_r + R_{NIR}},$$

де R_r , R_{NIR} — коефіцієнти відбиття в червоному та близькому інфрачервоному каналах сенсора відповідно.

Для даних ENVISAT MERIS еквівалентом індексу NDVI є індекс BOAVI, який обчислюється за формулою

$$BOAVI = \frac{R_{14} - R_8}{R_{14} + R_8}. \quad (3)$$

Обчислюючи попіксельно значення BOAVI за даними зображення MERIS можна сформувати нове зображення, яке є аналогом NDVI-зображення для цих даних (рис. II, а, кольорова вклейка). Одержані NDVI-, REP- та MTCI-зображення дозволяють сформувати синтезоване зображення, яке використовувалося для класифікації наземного покриву (рис. II, г).

РЕЗУЛЬТАТИ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

Класифікація двох типів зображень, побудованих за даними відеоспектрометра MERIS з просторовою розрізенністю 1200 м здійснювалась з допомогою методу MMDM. Для порівняння ви-

Таблиця 1. Значення вегетаційних індексів для різних класів земного покриву за даними ENVISAT MERIS

Земний покрив	NDVI (BOAVI)		REP (HM)		MTCI	
	min	max	min	max	min	max
Хвойні ліси	0.496	0.657	721.4	724.6	1.74	2.37
Листяні ліси	0.446	0.524	717.6	722.9	1.37	1.87
Пасовища та нелісовий покрив	0.408	0.535	718.9	721.7	1.39	1.89
Озима пшениця	0.466	0.623	721.1	724.9	1.79	2.57
Оголений ґрунт	0.148	0.361	712.1	717.0	1.13	1.14
Водна поверхня	-0.163	0.034	< 700	> 730	-2.57	0.49
Сніг	-0.087	-0.057	< 700	> 730	-20.87	-0.052

Таблиця 2. Зіставлення результатів класифікації з використанням різних типів зображень за даними MERIS та «Landsat 7» для площини 2105 км^2

Земний покрив	Доля площини, %			Відносна похибка класифікації ε , %	
	відбиття 15 каналів (MERIS)	NDVI, REP, MTCI (MERIS)	«Landsat 7»	15 каналів	NDVI, REP, MTCI
Хвойні ліси	36.3	40.4	55.8	34.9	27.5
Листяні ліси	13.1	15.3	8.8	32.8	42.5
Пасовища та нелісовий покрив	32.1	34.4	28.6	10.9	16.7
Сніг	18.5	9.9	6.2	66.5	37.4
Хмари	—	—	0.6	—	—
Загальна площа	100	100	100	Середнє 36.3	Середнє 31.0

користано результати класифікації космознімка тієї ж території, одержаного з КА «Landsat 7» з просторовою розрізняністю 30 м. Класифікація земного покриву за даними «Landsat 7» здійснювалася методом максимальної вірогідності із навчанням. Об'єкти для навчання включали ті відібрані класи вегетаційного покриву, які були вибрані на основі інвентаризаційного опису лісів на досліджуваній території. Крім цього, об'єктами для навчання були водна поверхня, населені пункти, пасовища, оброблювані землі та сніговий покрив.

У табл. 1 наведено діапазони змін вегетаційних індексів, обчислені за формулами (1)–(3) для виділених семи класів земного покриву. Слід відзначити, що для водної поверхні та снігу значення REP та MTCI виходять за межі діапазону значень для всіх решти класів зеленого покриву.

Результати класифікації свідчать, що у деяких випадках спостерігаються суттєві розбіжності між результатами, одержаними при обробці двох типів зображень, утворених за даними ENVISAT MERIS.

Класифікація зображення, побудованого на основі синтезу REP, MTCI та NDVI-зображені,

показала високу чутливість до рослинних об'єктів, які містять хлорофіл. Хвойні ліси у межах високогір'я, де чергуються покриті та не покриті лісом ділянки, виділяються точніше за комбінованим зображенням, ніж за зображенням, побудованим з використанням коефіцієнтів відбиття у 15 каналах відеоспектрометра MERIS. В той же час не зовсім точно класифікуються сільськогосподарські угіддя. Враховуючи час знімання (16 квітня), можна допустити, що у межах сільськогосподарських полів зображення, сформоване на основі вегетаційних індексів, вказує на стан посівів озимих культур та ступінь їхнього відновлення у весняний період.

На рис. III (кольорова вклейка) і в табл. 2 наведено результати класифікації двох типів зображень за даними MERIS (район г. Говерла). Ця ділянка знаходиться у правому нижньому куті території дослідження.

Як свідчать зіставлення результатів класифікації для тест-ділянки площею 2105 км^2 з даними табл. 2, класифікація за даними вегетаційних індексів NDVI, REP, MTCI дає точніші результати при визначенні хвойних лісів (рис. III, б), ніж класифікація з використанням відбиття в 15 каналах MERIS (рис. III, а).

Середня відносна похибка класифікації менша на 5 %.

Потенціал використання REP- та MTCI-зображень, що не залежать від топографічних ефектів, не вичерпуються лише можливістю точнішої класифікації наземного покриву гірських районів. Оскільки ці індекси чутливі до вмісту хлорофілу в листі та голках рослинності, це дозволяє оцінювати стан окремих видів лісової рослинності та виявити ділянки із несприятливими умовами зростання.

ВИСНОВКИ

Класифікація наземного покриву гірських районів Карпат методом мінімальної відстані до середнього з використанням REP, MTCI та NDVI зображень за даними ENVISAT MERIS дає кращі результати, ніж з використанням радіації чи відбиття в 15 каналах. Застосування вегетаційних індексів не вимагає проведення топографічної корекції і тому перспективне при дослідженні стану рослинного покриву гірських районів.

Результати проведених досліджень показують добру кореляцію між REP та MTCI і високий потенціал для моніторингу екосистем в гірських районах з використанням комбінації обох індексів.

Автори вдячні професору Барбарі Кох та доктору Клаусу-Петеру Гроссу з Фрайбургського університету за підтримку проекту досліджень, а також Європейському космічному агентству за надання знімка KA ENVISAT MERIS.

- Лялько В. І., Шпортук З. М., Сахацький О. І. та ін. Дослідження стану лісів з використанням позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Тез. докл. 5-ї Української конф. по косміческим исследованиям (НІЦУІКС, Евпаторія, 4–11 сент. 2005 р.). — Київ: Ин-т космич. исследований НАНУ-НКАУ, 2005.—С. 137.

- Шпортук З. М., Лялько В. І., П'яніло Я. Д. та ін. Спектральні методи обробки та аналізу інформації в дистанційному зондуванні рослинності. — Львів, 1993.—54 с.—(Препр. / АН України. Науково-учебний центр математичного моделювання ІППММ ім Я. С. Підстригача, № 4-93).
- Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., et al. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shift and comparison with information content of broad bands // Remote Sens. Environ.—1992.—41, N 2.—P. 133—142.
- Clevers J. G. P. W., Bartholomeus H. M., Mücher C. A., et al. Land covers classification with the Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) // New Strategies for European Remote Sens / Ed. Oluiic. — Rotterdam: Millpress, 2005.—P. 687—694.
- Collins W., Chang S. H., Raines G., et al. Airborne Biogeophysical Mapping of Hidden Mineral Deposits // Economic. Geol.—1983.—78, N 4.—P. 737—749.
- Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. J. Remote Sens.—2004.—25.—P. 5403—5413.
- Dawson J., Curran P. J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position // Int. J. Remote Sens.—1998.—19.—P. 2133—2139.

LAND COVER CLASSIFICATION IN UKRAINIAN CARPATHIANS USING THE MERIS TERRESTRIAL CHLOROPHYL INDEX AND RED EDGE POSITION FROM ENVISAT MERIS DATA

*V. I. Lyalko, Z. M. Shportuk, O. L. Sakhatskyi,
O. M. Sybirtseva*

We present some results of a preliminary study of the possibility to use MERIS data for land cover classification in the Ukrainian Carpathians. The ENVISAT MERIS data (16 April 2004) with a rough space resolution of 1200 m are used to calculate the red edge indices: the Red Edge Position (REP), MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI) and NDVI. The classification using REP and MTCI images gives better results than with reflectance by the method of minimum distance to means (MMDM). The calculation results showed that the MERIS image with a rough space resolution provided moderate classification results: only coniferous forests and snow are well classified. MTCI is sensitive to a broad range of the chlorophyll contents and much less sensitive to topographical effect in mountain region. The investigation results show a good correlation between REP and MTCI and a high potential for monitoring for the ecosystems in mountain regions using a combination of both indices.

УДК 514.18+681.32

В. И. Волошин¹, В. М. Корчинский²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет

Повышение информационности видовых данных дистанционного зондирования Земли

Надійшида до редакції 17.10.05

Пропонується методика підвищення інформативності цифрових знімків ДЗЗ на основі первинних багатоспектрального та панхромного зображень шляхом спільногом використання перетворення первинного багатоспектрального зображення у кольорову систему з розділенням інформації про яскравість та колір та вейвлет-технології оброблення цифрових зображень.

Повышение пространственного разрешения многозональных космических снимков относится к числу наиболее существенных задач предварительной обработки видовых данных ДЗЗ [1]. Одним из наиболее эффективных способов ее решения является синтез цифровых изображений, в которых совмещены информационные компоненты (концепция Data Fusion) первичных многоспектральных и панхромных видовых данных (соответственно спектральная информация и высокое пространственное разрешение), на основе вейвлет-технологий обработки двухмерных цифровых сигналов с оптимизацией по характеристикам визуального качества [2].

Предлагается метод повышения информативности многоспектральных космических снимков, основанный на оптимизируемой вейвлет-технологии синтеза цифровых изображений с использованием промежуточного преобразования первичных многозональных RGB-снимков в одну из цветовых систем растровой компьютерной графики, обеспечивающих разделение информации о яркости и информации о цветоразностных компонентах.

Совмещению данных предшествует преобразование первичного многоспектрального изображения (с относительно невысоким пространственным разрешением) в одну из цветовых систем с разделением яркостного и цветоразност-

ных компонентов (изложение ведется на примере системы YIG). Такое преобразование используется как один из способов совмещения видовых данных с повышением визуального качества синтезируемого многоспектрального снимка без учета количественных показателей его информативности (яркостный компонент последнего совпадает с яркостным компонентом панхромного изображения, а цветоразностные компоненты — с цветоразностными составляющими первичного многоспектрального снимка). В отличие от этого в данной статье указанное преобразование является лишь первым этапом предлагаемого метода повышения информативности многоспектральных цифровых снимков.

Непосредственно совмещение данных производится на основе формирования линейных форм детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразований первичного панхромного снимка и только яркостной компоненты многоспектрального изображения с последующей вейвлет-реконструкцией. Цветоразностные компоненты первичного многоспектрального снимка при этом сохраняются неизменными, что обеспечивает сохранение спектрального разрешения.

Как известно [3, 4], основной принцип вейвлет-анализа изображений состоит в представлении их распределений яркости в виде суммы аппроксимирующей и детализирующих состав-

ляющих, представляющих компоненты различных пространственных масштабов. После N этапов такой декомпозиции распределение яркости первичного изображения $f(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} — радиус-вектор поля снимка) может быть представлено в виде

$$f(\mathbf{r}) = f_N^{(a)}(\mathbf{r}) + \sum_{k=1}^N f_k^{(d)}(\mathbf{r}),$$

где $f_N^{(a)}(\mathbf{r})$, $f_k^{(d)}(\mathbf{r})$, $k = 1, \dots, N$ — аппроксимирующая и детализирующие составляющие.

Предлагаемый метод синтеза многоспектральных изображений с повышенным пространственным разрешением на основе первичных многозональных и панхромных снимков включает следующие основные шаги.

1. Представление первичного многоспектрального *RGB*-изображения в одной из цветовой систем, в которых реализуется разделение информации о яркости и цветовой информации (например, *HSV*, *YIG*, *YC_bC_r*; дальнейшее изложение ведется на примере системы *YIG*):

$$f_{RGB}(\mathbf{r}) \longrightarrow f_{YIG}(\mathbf{r}).$$

2. Вейвлет-декомпозиция первичного многоспектрального изображения до заданного уровня N компоненты яркости (применительно к системе *HSV* — компонент *V*, для систем *YIG* и *YC_bC_r* — компонент *Y*)

$$f_{YIG}(\mathbf{r}) = f_{YIG,N}^{(a)}(\mathbf{r}) + \sum_{k=1}^N f_{YIG,k}^{(d)}(\mathbf{r}).$$

3. Вейвлет-декомпозиция до уровня N первичного панхромного изображения:

$$f_P(\mathbf{r}) = f_{P,N}^{(a)}(\mathbf{r}) + \sum_{k=1}^N f_{P,k}^{(d)}(\mathbf{r}).$$

4. Формирование линейных комбинаций вейвлет-коэффициентов детализирующих составляющих:

$$C_{\text{син},k}^{(d)} = a C_{YIG,k}^{(d)} + b C_{P,k}^{(d)},$$

где a , b — коэффициенты, подлежащие определению.

5. Вейвлет-реконструкция — формирование синтезированного цифрового изображения на основе аппроксимирующей составляющей первичного многозонального снимка и полученных указанным способом детализирующих составляющих.

6. Преобразование синтезированного изображения в цветовую систему *RGB*:

$$F_{YIG}(\mathbf{r}) \longrightarrow F_{RGB}(\mathbf{r}),$$

где $F_{YIG}(r)$ — распределение яркости изображения, сформированного посредством вейвлет-реконструкции (п. 5).

Отметим принципиально важный момент — преобразованию на этапе вейвлет-реконструкции подвергается только компонент яркости при сохранении цветоразностных компонентов первичного многоспектрального снимка.

Для оценки информационного качества синтезированных изображений использовались следующие показатели:

1. Сигнальная энтропия, предложенная в работе [2]:

$$E = - \sum_{n=0}^{255} p_n \log_2 p_n,$$

где $p_n = nN_n / \sum_{m=0}^{255} mN_m$, N_n — количество пикселов с уровнем яркости n ($n = 0, \dots, 255$).

2. Среднее значение контраста

$$C = \left| \frac{C_i - \Sigma C_j}{C_i + \Sigma C_j} \right|,$$

где C_i — уровень яркости i -го пикселя, ΣC_j — сумма кодов яркости пикселов, смежных с i -м.

3. Предельная пространственная частота $\Omega_{\text{рп}}$

$$\Omega_{\text{рп}}^2 = \frac{E}{\log_2 [\Sigma n_i k_i + 1]},$$

где k_i — количество спектральных каналов, n_i — динамический диапазон кодов яркости соответствующего спектрального канала изображения в цветовой системе *RGB*, N - и M -размерности изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях.

4. Среднее квадратичное отклонение кодов яркости

$$\sigma = \sqrt{\Sigma [C_i - M(C)]^2 \cdot p_i},$$

где $M(C) = \Sigma C_i \cdot p_i$ — среднее значение, p_i — частота i -го кода яркости в изображении.

Данные показатели использовались как управляющие параметры при определении уровня вейвлет-декомпозиции N и коэффициентов линейных форм a , b , сформулированного как многокритериальная оптимизационная задача максимизации сигнальной энтропии, среднего значения контраста, среднего квадратичного откло-

нения уровней яркости и предельной пространственной частоты эквивалентного пространственного фильтра. Решение данной оптимизационной задачи производилось по методике, предложенной в работе [5].

На цветной вклейке (рис. IV) представлены первичные видовые данные и изображение, синтезированное предложенным методом.

Применительно к изображениям, представленным на рис. IV, б, в, повышение сигнальной энтропии, среднего значения контраста, среднего квадратичного отклонения уровней яркости и предельной пространственной частоты эквивалентного пространственного фильтра составило соответственно 6.9, 67.9, 1.4, 23.8 %.

Как показали проведенные численные эксперименты, для первичных изображений, зафиксированных в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах, наиболее эффективной промежуточной цветовой системой является цветовая метрика YIG как по критериям информативности, так и в отношении визуального качества синтезированных изображений.

1. Волошин В. И., Корчинский В. М. Повышение информационной значимости видовых данных дистанционного зондирования Земли // Пятая Украинская конфе-

ренция по комическим исследованиям: Сб. тезисов, 4–11 сентября 2005 г., НЦУИКС, Евпатория. — К.: Ин-т космических исследований НАНУ—НКАУ, 2005.—С. 146.

2. Волошин В. И., Корчинский В. М., Негода А. А. Повышение информативности панхроматных цифровых изображений дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 178—181.
3. Добеш И. Десять лекций по вейвлетам: Пер. с англ. — Москва—Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.—464 с.
4. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физ. наук.—2001.—171, № 5.—С. 465—501.
5. Han S. P. A Globally convergent method for nonlinear programming // J. Optimization Theory and Applications.—1977.—22.—Р. 297—302.

INCREASE OF INFORMATION SIGNIFICANCE OF EARTH'S REMOTE SENSING SPECIFIC DATA

V. I. Voloshin, V. M. Korchinski

We propose a method for the informative enhancement of digital images on the basis of initial multispectral and panchromatic images by sharing transformation of the initial multispectral image into colour palette with division of brightness/color information and image processing wavelet technology.

УДК 528.8

В. И. Волошин, Е. И. Бушуев, О. И. Паршина

Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

Разработка методики классификации покровных элементов ландшафта

Надійшла до редакції 17.10.05

Розглядається методика класифікації покривних елементів ландшафту за даними дистанційного зондування Землі як головної задачі керування територією в цілому. Наведено перелік класів покривних елементів, перелік технологічних операцій обробки супутниковых даних.

ВСТУПЛЕНИЕ

В ряду тематических задач, решаемых на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), задача определения ландшафтных элементов покрытия земли является одной из основных. Результат ее решения имеет как самостоятельное значение, так и служит основой для других тематических задач более высокого уровня детализации [1].

Работы по определению элементов покрытия земли являются ключевыми для инвентаризации земель, лесных и аграрных ресурсов, контроля природопользования и создания соответствующей национальной картографической базы данных для общего многоцелевого использования. Такая база данных имеет первостепенное значение для управления территорией в целом. По степени изменения площадей отдельных классов можно судить об эффективности политики развития региона (например, урбанизация территории, переход на мелкоконтурную систему аграрного производства, залеснение, мелиорация, изменение биоразнообразия и др.). Кроме того, используя маски определенных классов при последующей обработке данных ДЗЗ, можно существенно повысить эффективность решения темати-

ческих задач внутри этих классов. В европейской классификации тематических областей использования пространственных данных класс «покрытие земли» («Land Cover») является одним из приоритетных.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ МИРОВЫХ ДОСТИЖЕНИЙ

На сегодняшний день выполнено много исследований покровных элементов ландшафта. В большинстве своем эти работы можно разделить по следующим направлениям или группам.

1. Теоретические исследования и описания проблемы — среди методов классификации используются преимущественно традиционные методы контролируемой классификации, метод нейронных сетей, экспертные системы. Здесь можно отметить работы Научного центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины [2—4].

2. Классификация ландшафта конкретной географической зоны или одного из объектов ландшафта, например дельты рек, береговой линии и ее динамики, заповедника с целью картирования территории, видового определения, опреде-

ления состояния леса и так далее, в том числе Чернобыльской зоны отчуждения [5, 6].

3. Национальные разработки отдельных стран. Например, в работе (Kerri J. T., Cihlar J., Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, «Land use and cover with intensity of agriculture for Canada from satellite and census data») предложена схема метода формирования карты использования земель Канады. В соответствии с этой схемой спутниковые данные маскируются, создавая при этом два подмножества — сельскохозяйственных и несельскохозяйственных земель; далее выполняется ландшафтная классификация несельскохозяйственных земель, в том числе определяются пожары; классификация сельскохозяйственных земель выполняется отдельно с использованием агрономических, картографических и статистических данных и их интеграции с данными ДЗЗ.

4. Работы, привязанные к определенной съемочной системе. Например, интересной является модель определения ландшафтных элементов покрытия Земли по данным аппаратуры MODIS (Strahler A., Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, Boston, MODIS Land Cover and Land-Cover Change, Version 5.0). Методика предусматривает создание ежеквартальной тематической карты по 17 классам с пространственным разрешением один километр. Учитывая свободный доступ к данным MODIS, и высокую периодичность обновления данных, эта методика может быть ценным дополнением к рассматриваемой методике, которая ориентирована на использование данных более высокого пространственного разрешения.

5. Глобальные межгосударственные проекты. В настоящее время в рамках проекта INSPIRE (Heymann Y., Steenmans Ch., Croissille G. and Bossard M., 1994. CORINE Land Cover. Technical Guide. EUR12585, Office for Official Publications of the European Communities (Luxembourg); Büttner G., Feranec J., Jaffrain G., et al. The CORINE Land Cover 2000 Project EARSeL Proceedings 3, 3/2004 331; European Comission. Building European information capacity for environment and security. Final Report. Eur/21109.24/05/04 <http://Europe.eu.net>; <http://terrestrial.eionet.eu.int>) выполняются работы по созданию инфраструктуры пространст-

венной информации Европы — двадцать девять европейских стран стали участниками создания общеевропейской базы данных элементов покрытия земли (CORINE Land Cover). В результате сформированы национальные базы данных обобщенной экологической оценки территории стран; анализ базы данных позволяет определить доминирующие процессы изменения покрытия земной поверхности Европы.

Проект CORINE первоначально был осуществлен с 1985 по 1990 гг. в большинстве стран Европы. С целью обновления данных в 2000 г. Европейское агентство окружающей среды (EEA) и Объединенный центр исследований (JRC) начали совместные проекты IMAGE2000 и CLC2000. Первый из них обеспечивает национальные организации основным материалом для обновления базы данных за период 1990—2000 гг. — национальными мозаиками спутниковых данных «Landsat-7 ETM» высокой точности, второй — спецификацией базы данных, методологией ее обновления, организационными и координирующими вопросами. Национальные организации обеспечивают обязательное 50 %-е финансирование компании-разработчика проекта. Учреждения ЕС обеспечивают другую половину финансирования. Классификация ландшафта в большинстве стран выполнялась экспертами методом визуальной интерпретации спутниковых данных. В качестве инструмента картографирования распознанной информации большинство стран использовали программные продукты фирмы ESRI.

Требования спецификации проекта: масштаб — 1:100000, минимальный площадной объект карты — 25 га и минимальная ширина линейных элементов — 100 м; ошибка геопривязки для спутниковых данных 25 м для классифицированных типов покрытия земли — не хуже 100 м; точность классификации — 80 %. Требования нашей методики соответствуют европейской спецификации: масштаб — 1:100000, минимальный площадной объект карты — 5 га; геометрическая точность — 70 м; точность классификации — 80 %.

Стандартная европейская спецификация типов покрытия земли включает 44 класса. Они сгруппированы в трехуровневую иерархию и приведены в таблице.

Как видно, многие из классов являются близ-

Классы европейской спецификации типов покрытий земли

Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
1. Искусственные поверхности	1.1 Городская застройка 1.2 Индустримальный 1.3 Свалки и участки строительства 1.4 Искусственные несельскохозяйственные области	1.1.1 Непрерывная городская застройка 1.1.2 Прерывная городская застройка коммерческий и транспортный модули 1.3.1 Минеральные участки извлечения (полезные ископаемые) 1.3.2 Участки свалки 1.3.3 Участки строительства 1.4.1 Зеленые городские области (парки) 1.4.2 Порт и области отдыха (досуга)
2. Сельскохозяйственные области	2.1 Пахотная земля 2.2 Многолетние культуры 2.3 Пастбища 2.4 Гетерогенные сельскохозяйственные области	2.1.1 Неорошающаяся пахотная земля 2.1.2 Постоянно орошающаяся земля 2.1.3 Поля риса 2.2.1 Виноградники 2.2.2 Сады и плантации ягоды 2.2.3 Оливковые рощи 2.3.1 Пастбища 2.4.1 Однолетние культуры с вкраплением многолетних 2.4.2 Сложные образцы культивирования 2.4.3 Земля
3. Лес и полуставственные области	3.1 Леса 3.2 Кустарники и/или травяные ассоциации 3.3 Открытые площадки с незначительной растительностью	3.1.1 Лиственний лес 3.1.2 Хвойный лес 3.1.3 Смешанный лес 3.2.1 Естественное поле — луг 3.3.1 Берега
4. Заболоченные земли	4.1 Внутренние заболоченные земли 4.2 Морские заболоченные земли	4.1.1 Внутренние болота 4.1.2 Трясины торфа 4.2.1 Соляные болота 4.2.2 Солончаки 4.2.3 Заливные области
5. Водные объекты	5.1 Внутренние воды 5.2 Морские воды	5.1.1 Водные течения (проточная вода) — реки 5.1.2 Водные тела — водоемы 5.2.1 Прибрежные лагуны 5.2.2 Устья 5.2.3 Море и океан

кими или даже идентичными с точки зрения отражательной способности, например класс «городские парки», отнесенный к искусственным поверхностям, и класс «лиственний лес», принадлежащий природным объектам. Понятно, что ни один из методов классификации не в состоянии разделить эти классы однозначно.

Несмотря на достаточно большой мировой опыт, в Украине до последнего времени не было методической базы классификации наземных объектов по космическим снимкам.

МЕТОДИКА

Проект методики, разработанный к настоящему времени государственным предприятием (ГП) «Днепрокосмос», соответствует общеевропейской спецификации покрытия Земли. В качестве инструмента обработки данных ДЗЗ используется программное изделие (ПИ) «Радуга», установленное, например, в Национальном центре испытаний и управления космическими средствами. Методика позволяет с применением внед-

ренного в рамках Национального космического агентства Украины программно-технического комплекса проводить практические работы по классификации покровных элементов земли.

Разработанный ГП «Днепрокосмос» пакет методической документации включает:

- спецификацию классов — описание классов и графические примеры выделения классов на спутниковых данных;
- проект методики — основные требования к исходным данным и конечному информационному продукту, логическая модель обработки данных;
- руководство пользователя — описание операций обработки данных дистанционного зондирования и их интерфейса с пользователем в среде ПИ «Радуга».

Документ содержит теоретическое обоснование и практическое описание работы с отдельными функциями и процедурами ПИ, которые могут быть использованы при классификации ландшафта. Также в этом документе приведен перечень вспомогательных данных и дополнительных процедур обработки для идентификации каждого из специфицированных классов покрытия земли.

Разработаны:

- программа и методика испытаний, содержащая контрольный пример;
- методика аттестации результатов отработки методики;
- пособие по работе с топографическими картами.

На современном этапе разработки методики основная проблема заключается в том, что практически невозможно для различных данных ДЗЗ выстроить однозначную цепочку последовательно выполняемых операций обработки данных. Многое зависит от времени (сезона) съемки и, как правило, для обработки одной и той же территории необходимо иметь разновременные данные.

Последовательность операций обработки данных, реализованная к текущему моменту средствами ПИ «Радуга», следующая.

Осуществляется привязка данных к номенклатурному листу топографической карты, выделение фрагмента, соответствующего номенклатурному листу.

Операции обработки:

- преобразование по методу главных компонентов;
- расчет вегетационного или других индексов;
- определение на исходном снимке областей интереса методом затравочных пикселей (с использованием растровой топографической карты и возможности связывания данных), сливание областей интереса, наращивание их до тех пор, пока с точки зрения оператора область интереса не покроет адекватно территорию на снимке и не сформирует соответствующий класс; создание и удаление областей интереса, вычисление статистики, оценка их разделимости, сохранение и восстановление из файла и т. д.;
- конвертирование областей интереса в классы и наоборот;
- маскирование данных;
- классификация с помощью любой из известных технологий (неконтролируемая классификация, классификация с обучением, в том числе методом нейронных сетей, построение экспертных систем) всего снимка или отдельных его фрагментов;
- сегментация классов;
- слияние изображений — результатов классификации в один файл;
- визуальный контроль результатов классификации;
- интерактивное переопределение классов, цветовое картирование классов;
- оценка качества и точности классификации;
- постклассификационные процедуры, удаление единичных пикселей, сглаживание, фильтрация, вычисление статистики классов;
- создание тематической карты.

На цветной вклейке (рис. V) приведен пример тематической карты покровных элементов ландшафта, построенной на основе одного номенклатурного листа топографической карты М 1:100000.

Следует сказать, что проблема разделимости на классы объектов, которые имеют близкую или даже одинаковую отражательную способность, трудноразрешима и, наверное, все равно потребует ручной корректировки результатов классификации по снимку.

Дальнейшие исследования направлены на разработку экспертных систем для обнаружения

отдельных классов покрытия земли, а также дополнительных модулей, которые бы, учитывая результаты классификации и принимая во внимание форму объектов, например линейность — узкие направленные полосы однородных пикселов, — могли бы разделить вегетацию природную (узкие извилистые балки) или полуприродную (лесополосы) и сельскохозяйственные посевы на полях, имеющие четкую полигональную форму.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разрабатываемая впервые в Украине методика классификации покровных элементов ландшафта в автоматизированном режиме обработки данных соответствует требованиям европейской спецификации и методологии.

2. Основными данными должны быть разновременные многоспектральные снимки территории среднего разрешения (10—15 м).

3. Для эффективного внедрения методики необходимо обеспечение вспомогательными данными — топографическими, тематическими картами; статистическими данными, планами отдельных хозяйств и районов, экспертными знаниями, достаточной временной выборкой спутниковых данных по сети тестовых участков, обоснованно выбранных по всей территории страны.

4. Следует продолжить разработку дополнительных программных модулей в среде ПИ «Радуга», которые бы позволили максимально автоматизировать процесс эксплуатации методики.

5. Тематические карты покровных элементов ландшафта являются информационной основой для управления территорией в целом и для более глубокого дешифрирования спутниковой информации в рамках отдельных тематических классов.

Главный вывод — в Украине осуществляется процесс практической отработки методики классификации покровных элементов ландшафта автоматизированными в программной среде ПИ «Радуга» процедурами в научных целях, а также с целью практического применения в управлении и мониторинге территорий. Такая работа,

выполненная для всей Украины, позволит стране стать равноправным участником глобальных межгосударственных проектов в интересах развития украинского общества.

1. Бушуев Е. И., Паршина О. И., Саблина В. И. и др. Разработка методики классификации покровных элементов ландшафта // Пятая Украинская конференция по комическим исследованиям: Сб. тезисов. 4—11 сентября 2005 г., НЦУИКС, Евпатория. — К.: Инт космических исследований НАНУ—НКАУ, 2005.—С. 140.
2. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Котляр А. Л. Ландшафтная классификация и оценка фитометрических параметров растительного покрова с использованием многоzonальных снимков в оптическом диапазоне сканера МСУ-В КА «Океан-О» // Матеріали III наради користувачів аерокосмічної інформації (20—24.11.2000 р., м. Київ). — Київ, Знання України, 2001.—С. 77—85.
3. Лялько В. І., Сахальський О. І., Азімов О. Т. та ін. Використання багатозональних космічних знімків з метою вивчення рослинності Зони відчуження ЧАЕС // Матеріали науково-технічного семінару «Нові методи в аерокосмічному землезнавстві», 27—28 травня 1999 р., Київ. Київ, 1999.—С. 105—113.
4. 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.—2002.—С. 76—83.
5. Федоровський О. Д. Про дешифрування космічних знімків природних ландшафтів // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. Методичний посібник по тематичній інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок / Під ред. В. І. Лялька. — Київ: ЦАКДЗ ГГН НАНУ, 1999.—С. 46—49.
6. Leummens H. J. L., Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V., et al. Classification of main landscape units (RIZA report № 2000.037; MD report № MD CAE 2000.29) // Pechora delta: Structure and dynamics of the Pechora delta ecosystems (1995—1999). — Lelystad (The Netherlands), 2000.—P. 37—80.

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR CLASSIFICATION OF INTEGUMENTARY ELEMENTS OF A LANDSCAPE

V. I. Voloshyn, Ye. I. Bushuyev, O. I. Parshyna

Methodical maintenance for classification of integumentary elements of a landscape is considered on the basis of data of the Earth's remote sensing as the primary goal of management of territory. The classes of integumentary elements and technological operations of satellite data processing are listed.

УДК 551.46

А. С. Запевалов¹, К. В. Показеев², В. В. Пустовойтенко¹

¹Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь,
sevzepter@mail.ru

²Московський державний університет ім. М. В. Ломоносова, Москва, Росія
sea@phys.msu.su

О соотношении зеркальной и брегговской составляющих при рассеянии радиоволн квазигауссовой морской поверхностью

Надійшла до редакції 16.03.06

Співвідношення дзеркальної і бреггівської складових у відбитому морською поверхнею радіосигналі аналізується на основі відомих моделей розсіяння і даних прямих вимірювань ухилів морської поверхні. Вимірювання проводилися з океанографічної платформи на Чорному морі за допомогою двовимірного лазерного ухиломіра. Показано, що при радіозондуванні морської поверхні відхилення розподілу ухилів від розподілу Гаусса в основному виявляється при кутах падіння радіохвиль до 15°. Врахування квазігауссового характеру розподілу ухилів приводить до зміни на 1...2° області кутів падіння, в якій дзеркальна складова переважає бреггівську.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время явление рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью изучено достаточно подробно. Установлены механизмы и основные закономерности рассеяния радиоволн, разработаны их модели [1, 6, 7, 15, 18, 26 и др.], созданы эксплуатационные системы спутникового радиолокационного (РЛ) мониторинга морской поверхности. Показано, что доминирующими физическими механизмами, определяющими рассеяние радиоволн морской поверхностью, являются резонансное (брегговское) рассеяние и зеркальное отражение.

Развитие спутниковых РЛ-средств мониторинга морских акваторий и приводного слоя атмосферы потребовало разработки проблемно-ориентированных моделей (модуляционных передаточных функций), направленных на интерпретацию информации, получаемой конкретным классом приборов дистанционного зондирования

(ДЗ). В качестве одной из них назовем модель CMOD4 [24], предназначенную для интерпретации информации, получаемой с помощью спутниковых скаттерометров. Для описания морской поверхности авторы моделей используют как представления о полностью развитом волнении, так и интегральные данные о полях волнения и ветра практически по всей акватории Мирового океана, как в модели CMOD4. Естественно, что при этом вне поля зрения моделей оказываются другие, более тонкие характеристики морской поверхности и приводного слоя атмосферы.

Анализ аэрофотоснимков солнечных бликов на морской поверхности показал, что асимметрия ориентированного вдоль ветра компонента уклонов зависит от скорости ветра, а значения эксцесса заметно отличаются от значений, соответствующих нормальному распределению [19]. Позднее данные измерений, полученные с помощью двумерного лазерного уклономера, подтвердили эти результаты [16, 20]. Лонге-Хиг-

гинсом [23] рассмотрены механизмы, приводящие к отклонению статистик уклонов от значений, соответствующих распределению Гаусса, и показано, что основным из них является амплитудная модуляция коротких волн длинной волной, которая может приводить к асимметрии уклонов, согласующейся по величине и знаку с наблюдавшейся в экспериментах. В работе [5] в рамках более общей кинематической модели показано, что модуляция не только изменяет асимметрию распределения уклонов, но также изменяет значение его четвертого момента.

В настоящей работе теоретически исследуется влияние отклонения распределения уклонов морской поверхности от нормального на соотношение зеркальной и брегговской составляющей при рассеянии радиоволн взволнованной морской (океанской) поверхностью. Анализ проводится на основе известных моделей рассеяния радиоволн и полученных в натурных условиях данных прямых измерений уклонов морской поверхности.

КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ

При анализе зависимости нормированного сечения обратного рассеяния (удельной эффективной поверхности рассеяния — УЭПР) σ^0 от угла падения РЛ-сигнал может быть представлен в виде суммы резонансной (брегговской) и зеркальной составляющих

$$\sigma_{\Sigma}^0 = \sigma_{br}^0 + \sigma_{sp}^0. \quad (1)$$

Представление (1) является приближенным, поскольку в реальных условиях на морской поверхности есть не только резонансные и зеркальные, но и другие, «нерезонансные» и «незеркальные» рассеиватели: обостренные перед обрушением гребни энергонесущих и более мелких волн [8, 9, 13, 21], брызги и пена, образующиеся при обрушении морских волн [9], выглаженные участки морской поверхности и т. д. В последнее время в соотношение (1) предложено вводить слагаемое, интегрально учитывающее вклад в формирование РЛ-сигнала перечисленных «нерезонансных» элементов морской поверхности [22].

Поскольку детальный анализ «нерезонансных» механизмов формирования РЛ-сигнала взволнованной морской поверхностью выходит за рамки

работы, отметим только, что вклад тех или иных механизмов в формирование РЛ-сигнала изменяется в зависимости от условий наблюдения морской поверхности и ее состояния. Так, например, для береговых и корабельных РЛ-станций (РЛС), работающих в сантиметровом диапазоне, доминирует резонансное рассеяние при заметной роли «нерезонансных» механизмов. В то же время для береговых и корабельных РЛС, работающих в дециметровом — декаметровом диапазонах, РЛ-сигнал формируется за счет резонансного рассеяния радиоволн. Для спутниковых РЛС БО «Космос-1500», «Океан-01», «Сич» теряет смысл учет эффектов рассеяния радиоволн непосредственно на заостренных гребнях морских волн перед их обрушением (при использовании вертикальной поляризации эти эффекты не наблюдаются [21]), но необходим интегральный учет выглаживания морской поверхности и ее покрытия пеной. Квазизеркальное отражение доминирует при малых углах падения, а при использовании многопозиционных РЛ-систем — и в области «прямого» сигнала.

Условием брегговского резонанса, связывающим волновые числа электромагнитных K и морских поверхностных k волн, является соотношение $k = K2\sin\theta$. Базовая модель брегговского рассеяния имеет вид [1, 18, 25]

$$\sigma_{br}^0(K, \theta, \alpha) = 16\pi K^4 |G_p(\theta)|^2 S(k, \alpha), \quad (2)$$

где θ — угол падения, α — азимутальный угол, $G_p(\theta)$ — геометрический коэффициент, зависящий как от геометрии наблюдения поверхности, так и от поляризации излучаемого и принимающего РЛС сигнала и от электрофизических (диэлектрическая проницаемость) параметров морской воды, $S(k, \alpha)$ — спектр волновых чисел и направлений на масштабе резонансных поверхностных волн. При наличии длинных волн выражение (2) несколько видоизменяется [22]:

$$\hat{\sigma}_{br}^0 = \sigma_{br}^0(1 + g\xi_{\uparrow}^{-2}), \quad (3)$$

где g — поляризационный коэффициент, ξ_{\uparrow}^{-2} — дисперсия уклонов доминантных волн в направлении радиозондирования.

Зеркальное рассеяние описывается выражением [25]

$$\hat{\sigma}_{sp}^0 = \pi \cdot |R|^2 \cdot \sec^4\theta \cdot P(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp}), \quad (4)$$

где R — коэффициент отражения для нулевого угла падения, $P(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp})$ — двумерная плотность вероятностей уклонов морской поверхности в плоскости падения радиоволн ξ_{\uparrow} и в перпендикулярном направлении ξ_{\perp} .

Вид зависимостей параметров $\hat{\sigma}_{br}^0$ и $\hat{\sigma}_{sp}^0$ от угла падения θ , как это следует из выражений (2) — (4), в основном определяется характером распределений компонентов уклонов и спектром $S(k, \alpha)$.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для анализа воспользуемся результатами натурных исследований изменчивости уклонов морской поверхности, проведенных на океанографической платформе Морского гидрофизического института НАН Украины. Подробное описание методики исследований, измерительной аппаратуры и полученных результатов представлено в работах [3, 4, 16, 17]. Здесь же укажем, что исследования осуществлялись с помощью двухмерного лазерного уклонометра, проведено 276 сеансов измерений при скоростях ветра от 0.6 до 14.3 м/с. Глубина моря в месте расположения океанографической платформы составляет 30 м, что для Черного моря соответствует условию «глубокой воды».

Уклоны морской поверхности имеют квазинормальное распределение. Для моделирования плотности вероятностей подобных процессов обычно используются аппроксимации, построенные на основе рядов Грамма — Шарлье [12]. Коэффициенты ряда Грамма — Шарлье рассчи-

тываются по эмпирическим значениям статистических моментов. Поскольку в натурных экспериментах, как правило, определяются статистические моменты не старше четвертого порядка, то аппроксимация плотности вероятностей ограничена первыми пятью членами ряда.

Для нормированных на собственную среднюю квадратичную величину компонентов уклонов, учитывая, что их среднее значение равно нулю, одномерную плотность вероятностей уклона ξ_x вдоль оси OX можно представить в виде [3]

$$P(x) = P_N(x) \left[1 + \frac{1}{6} A_x H_3(x) + \frac{1}{24} E_x H_4(x) \right], \quad (5)$$

где $x = \xi_x / \sqrt{\xi_x^2}$, P_N — одномерная плотность вероятностей распределения Гаусса, A_x и E_x — асимметрия и эксцесс уклона ξ_x , H_3 и H_4 — ортогональные полиномы Чебышева — Эрмита третьего и четвертого порядка.

Рассмотрим две предельные ситуации, когда зондирование проводится в направлениях вдоль и поперек направления распространения волн. Значение асимметрии и эксцесса компонентов уклонов, ориентированных вдоль (индекс u) и поперек (индекс c) основного направления распространения волн представлены на рис. 1.

Поскольку компоненты уклонов ξ_u и ξ_c между собой не коррелируют [3, 19], то их двумерная плотность вероятностей равна $P(\xi_u, \xi_c) = P(\xi_u)P(\xi_c)$. Учитывая (5), для нормированных компонентов уклонов

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}_u &= \xi_u / \sqrt{\xi_u^2}, \\ \tilde{\xi}_c &= \xi_c / \sqrt{\xi_c^2} \end{aligned} \quad (6)$$

получаем

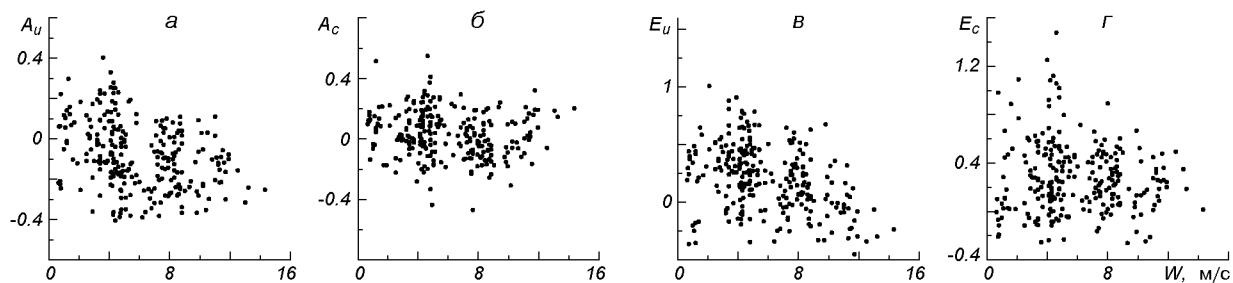


Рис. 1. Зависимости статистических моментов продольной и поперечной составляющих уклонов морской поверхности от скорости ветра

$$P(\tilde{\xi}_u, \tilde{\xi}_c) = P_{2N}(\tilde{\xi}_u, \tilde{\xi}_c) \times \\ \times \left[1 + \frac{1}{6} A_u H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} E_u H_4(\tilde{\xi}_u) \right] \times \\ \times \left[1 + \frac{1}{6} A_c H_3(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{24} E_c H_4(\tilde{\xi}_c) \right],$$

где $P_{2N}(\tilde{\xi}_u, \tilde{\xi}_c)$ — двумерная плотность вероятностей нормального распределения.

Следует добавить, что асимметрия и эксцесс продольного и поперечного компонента уклонов между собой некоррелированы [3].

ЭФФЕКТ КВАЗИГАУССОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УКЛОНОВ

Из выражений (4) и (6) следует, что при квазизеркальном отражении влияние на УЭПР отклонений асимметрии и эксцесса компонентов уклонов от значений, соответствующих нормальному распределению, определяется выражением

$$\varepsilon = \hat{\sigma}_{sp}^{0R} / \hat{\sigma}_{sp}^{0G} = \\ = \left[1 + \frac{1}{6} A_u H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} E_u H_4(\tilde{\xi}_u) \right] \times \\ \times \left[1 + \frac{1}{6} A_c H_3(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{24} E_c H_4(\tilde{\xi}_c) \right],$$

где $\hat{\sigma}_{sp}^{0R}$ и $\hat{\sigma}_{sp}^{0G}$ — нормированное сечение обратного рассеяния, рассчитанное для реальной и гауссовой поверхности. Полученные при фиксированных углах и разных скоростях ветра значения параметра ε представлены на рис. 2.

Происходящее с увеличением скорости ветра увеличение асимметрии продольного компонента уклона практически не оказывает влияния на вероятность бликов при зондировании под углами, близкими к надиру. Это относится и к ненулевым значениям асимметрии поперечного уклона, имеющим место в ситуациях, когда направления ветра, течения и зыби не совпадают. Объясняется это тем, что полином Чебышева — Эрмита третьего порядка, определяющий вклад асимметрии распределения в ε , является нечетной функцией:

$$H_3(\tilde{x}) = \tilde{x}^3 - 3\tilde{x},$$

и при малых углах зондирования близок к нулю. Ненулевые значения эксцесса приводят в сред-

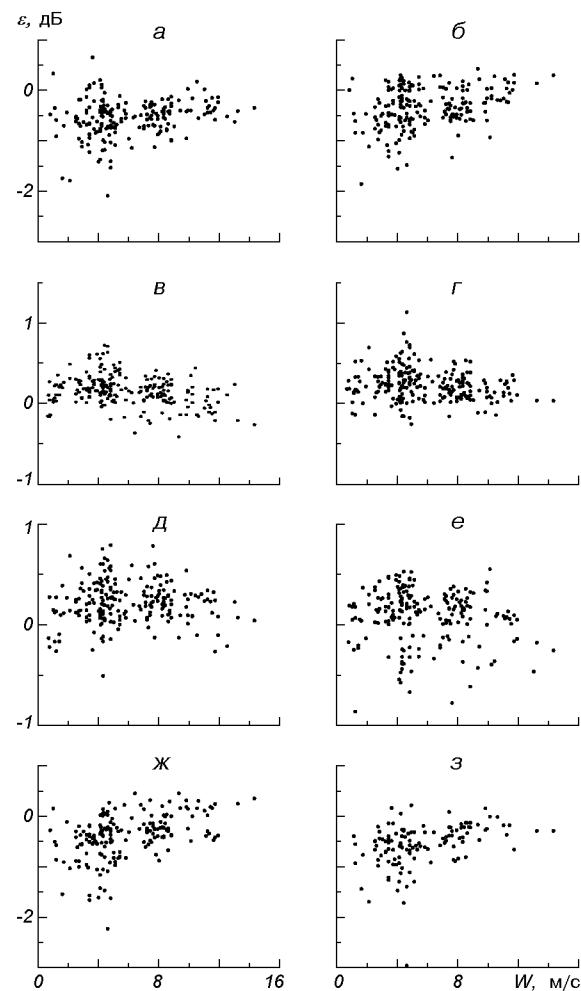


Рис. 2. Зависимости параметра ε от скорости ветра W : *a, б* — $\theta = -9^\circ$, *в, г* — $\theta = -3^\circ$, *д, е* — $\theta = 3^\circ$, *ж, з* — $\theta = 9^\circ$ (*а, в, д, ж* — зондирование вдоль направления распространения волн; *б, г, е, з* — поперек)

нем к 10 % увеличению зеркальной составляющей в отраженном радиосигнале.

Значительно заметнее проявления ненулевых значений асимметрии и эксцесса уклонов при наклонном зондировании. При углах зондирования $\theta = 3\dots4^\circ$ значения ε в среднем выше, чем рассчитанные для гауссовой поверхности. В отдельных случаях превышение может достигать 29 %, что соответствует увеличению $\hat{\sigma}_{sp}^{0R}$ на 1.1 dB. Отклонения значений параметра ε от единицы при малых углах в основном определяются разбросом величин эксцесса.

Полином Чебышева — Эрмита четвертого порядка является четной функцией:

$$H_4(\tilde{x}) = \tilde{x}^4 - 6\tilde{x}^2 + 3.$$

Поскольку средние значения E_u , и E_c являются положительными и равны соответственно 0.22 и 0.28, то в области малых уклонов в большинстве случаев справедливо неравенство

$$P(\tilde{\xi}_u, \tilde{\xi}_c) > P_{2N}(\tilde{\xi}_u, \tilde{\xi}_c).$$

При зондировании под углами от 10 до 15° вероятность в среднем ниже, и расхождение может превышать 40 % или 1.46 дБ. Отличительной особенностью оценок параметра ε является их большой разброс, что является следствием разброса значений статистических моментов компонентов уклонов.

СООТНОШЕНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ И БРЕГГОВСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Анализ соотношения между квазизеркальной и резонансной составляющими при формировании РЛ-сигнала весьма важен как с точки зрения углубления понимания физики рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью и интерпретации информации, получаемой при ДЗ морской поверхности, так и с точки зрения выбора наиболее оптимальных условий наблюдения морской поверхности при проектировании систем ДЗ космического базирования.

Отметим, что граница между «резонансной» и «квазизеркальной» областями в зависимости $\sigma^0(\theta)$ весьма размыта и зависит от состояния морской поверхности и условий ее наблюдения (падения) [2]. При этом существует достаточно широкая область углов наблюдения, в которой характеристики РЛ-сигнала могут быть рассчитаны как в рамках двухмасштабной модели, так и методами геометрической оптики. Так, результаты теоретических и экспериментальных исследований рассеяния волн на взволнованной поверхности [10, 11] показали, что расчеты величины УЭПР морской поверхности в рамках двухмасштабной модели могут выполняться вплоть до углов падения $\theta \approx 5\ldots10^\circ$. В последующем эти выводы были подтверждены и результатами экспериментов, выполненных в кольцевом шторм-бассейне МГИ НАН Украины [2]:

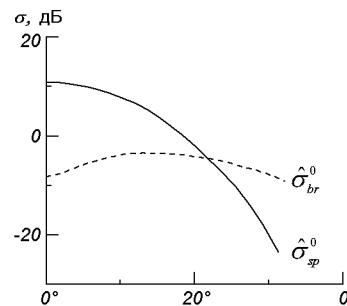


Рис. 3. Зависимость резонансной и зеркальной составляющей РЛ-сигнала от угла наблюдения морской поверхности [14]

экспериментально было показано, что граница перехода от «резонансного» к «квазизеркальному» механизмам формирования РЛ-сигнала при скоростях ветра $W = 5\ldots7$ м/с находится в интервале углов падения $\theta \approx 10\ldots15^\circ$.

Соотношение зеркальной и резонансной составляющих в отраженном от гауссовой поверхности РЛ-сигнале анализировалось в работе [14]. Предполагалось, что азимутальное распределение энергии коротких поверхностных волн (ряби) является изотропным, а спектр поверхностных волн $S(k, \alpha)$ в (2) можно описать моделью, построенной на основе кинетического уравнения, которая учитывает диссиацию энергии за счет вязкости и нелинейных механизмов (обрушения волн) [22].

Согласно работе [14] равенство $\hat{\sigma}_{sp}^0(\theta) = \hat{\sigma}_{br}^0(\theta)$ имеет место при углах падения, на которых $\hat{\sigma}_{sp}^0$ снижается более чем на 13 дБ (см. рис. 3). Эти углы падения соответствуют уклонам морской поверхности, более чем в два раза превышающим их среднюю квадратичную величину. Аппроксимации квазигауссовых процессов в форме (5), построенные на основе конечного числа членов ряда Грама — Шарлье, хорошо описывают плотность вероятностей при относительно небольших значениях аргумента, но могут приводить к отрицательным значениям на «крыльях» распределения [12]. Для компонентов уклонов аппроксимацию (5) можно применять при $|\tilde{\xi}_u| < 3$ и $|\tilde{\xi}_c| < 3$ [5].

Учитывая указанные ограничения в возможности использования аппроксимации (5), дальнейший анализ будем проводить на основе эмпирической плотности вероятностей компонен-

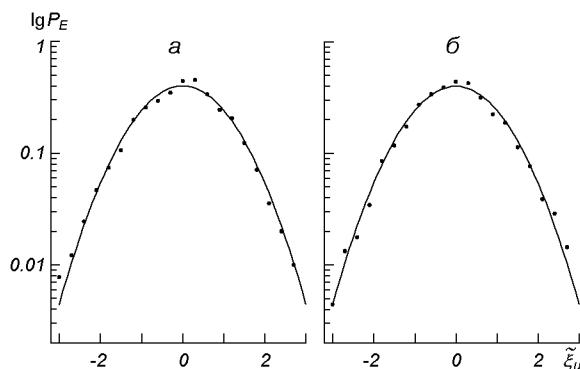


Рис. 4. Эмпирические плотности вероятностей уклонов при слабых (а) и сильных ветрах (б): точки — результаты наблюдений, сплошные линии — аппроксимирующие их функции

тов уклонов. Эмпирическую плотность вероятности определим как гистограмму, нормированную на длину выборки и на ширину разряда, и обозначим как P_E .

Эмпирические плотности вероятностей уклонов, построенные для слабых и сильных ветров представлены на рис. 4, а и 4, б соответственно. При расчете гистограмм компонентов уклонов ширина разряда была принята равной 0.3. Изменчивость P_E при сильных ветрах относительно невелика. Для продольного компонента уклонов характерно смещение максимума P_E в сторону значений, соответствующих переднему склону длинной доминантной волны. При слабых ветрах наблюдается более сильная изменчивость P_E , что можно было ожидать, учитывая большой разброс значений асимметрии и эксцесса компонентов уклонов (см. рис. 1). Она вызвана тем, что в подобных гидрометеорологических ситуациях ветер перестает быть доминирующим фактором, определяющим характеристики коротких волн, которые дают основной вклад в статистические моменты уклонов.

Отклонения от распределения Гаусса у компонентов уклонов в основном проявляются при относительно небольших значениях безразмерных параметров $\tilde{\xi}_u$ и $\tilde{\xi}_c$. В областях $|\tilde{\xi}_u| > 2$ и $|\tilde{\xi}_c| > 2$ разброс значений $\tilde{\xi}_u$ и $\tilde{\xi}_c$, при которых достигаются одинаковые значения P_E и распределения Гаусса, не превышает 0.2. Используя эмпирические зависимости дисперсии компонентов уклонов от скорости ветра W [16], получаем

$$\begin{aligned}\tilde{\xi}_c^2 &= 0.0014 + 0.00162 W, \\ \tilde{\xi}_u^2 &= 0.0041 + 0.0205 W.\end{aligned}$$

Нетрудно показать, что учет указанного разброса приводит к изменению ширины области углов падения, где справедливо неравенство

$$\hat{\sigma}_{sp}^0(\theta) > \hat{\sigma}_{br}^0(\theta), \quad (7)$$

на $1\dots 2^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет реальных значений статистических моментов уклонов при зондировании взволнованной морской поверхности в надир приводит в среднем к 10 % увеличению зеркальной составляющей в отраженном радиосигнале. Значительно заметнее проявления ненулевых значений асимметрии и эксцесса уклонов при наклонном зондировании. При углах зондирования $\theta = 3\dots 4^\circ$ значения ε в среднем выше, чем рассчитанные для гауссовой поверхности. В отдельных случаях превышение может достигать 29 %, что соответствует увеличению $\hat{\sigma}_{sp}^{0R}$ на 1.1 dB. При зондировании под углами от 10 до 15° расхождение может превышать 40 % или 1.46 dB.

Отклонения от распределения Гаусса у компонентов уклонов проявляются в основном при относительно небольших углах падения. В областях $|\tilde{\xi}_u| > 2$ и $|\tilde{\xi}_c| > 2$ эти отклонения, как правило, невелики. Их учет приводит к изменению на $1\dots 2^\circ$ ширины области углов падения, где справедливо неравенство (7).

Работа выполнена при поддержке проекта ФЦП «Мировой океан» 43.634.11.0001-7.9 и проекта УНТЦ Р-2241.

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972.—424 с.
2. Галаев Ю. М., Больщаков А. Н., Ефимов В. Б. и др. Некоторые характеристики радиолокационных отражений поверхностью моря при углах падения, близких к вертикальным. — Севастополь, 1978.—24 с.—(Препринт / АН УССР, МГИ; № 1).
3. Запевалов А. С. Изменчивость характеристик локальных уклонов морской поверхности // Прикладная гидромеханика.—2005.—7(79), № 1.—С. 17—21.
4. Запевалов А. С., Показеев К. В. Контроль состояния морской поверхности средствами лазерного зондирования // Четвертая Всероссийская конф. «Физические

- проблемы экологии (Экологическая физика)». — М., 2004.—№ 12.—С. 200—212.
5. Запевалов А. С., Ратнер Ю. Б. Аналитическая модель плотности вероятностей уклонов морской поверхности // Морской гидрофиз. журн.—2003.—№ 2.—С. 3—17.
 6. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. — М.: Сов. радио, 1968.—224 с.
 7. Исакович Е. М. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // Журн. эксперим. и теорет. физики.—1952.—23, № 3.—С. 305—314.
 8. Калмыков А. И., Курекин А. С., Лемента Ю. А. и др. Некоторые особенности обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона поверхностью моря при малых углах скольжения. — Харьков, 1974.—40 с.—(Препринт / АН УССР, ИРЭ; № 40).
 9. Калмыков А. И., Курекин А. С., Лемента Ю. А. и др. Особенности рассеяния СВЧ-излучения на обрушающихся морских волнах // Изв. вузов. Радиофизика.—1976.—19, № 9.—С. 1315—1321.
 10. Калмыков А. И., Лемента Ю. А., Островский И. Е. и др. Энергетические характеристики рассеяния радиоволн УКВ диапазона взволнованной поверхностью моря. — Харьков, 1976.—60 с.—(Препринт / АН УССР, ИРЭ; № 71).
 11. Калмыков А. И., Розенберг А. Д., Зельдис В. И. Обратное рассеяние звуковых и радиоволн нерегулярной рябью // Изв. вузов. Радиофизика.—1967.—10, № 6.—С. 797—802.
 12. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений. — М.: Наука, 1966.—587 с.
 13. Кравцов Ю. А., Митягин М. И., Чурюмов Л. Н. Нерезонансный механизм рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности: рассеяние на круtyх заостренных волнах // Изв. вузов. Радиофизика.—1999.—42, № 3.—С. 240—254.
 14. Кудрявцев В. Н., Малиновский В. В. Вклад зеркальных отражений в радиолокационных изображениях морской поверхности // Исследования Земли из космоса.—2004.—№ 3.—С. 3—11.
 15. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. — М.: АН СССР, 1961.—545 с.
 16. Христофоров Г. Н., Запевалов А. С., Бабий М. В. Статистические характеристики уклонов морской поверхности при разных скоростях ветра // Океанология.—1992.—32, вып. 3.—С. 452—459.
 17. Христофоров Г. Н., Запевалов А. С., Бабий М. В. Измерения параметров шероховатости морской поверхности при переходе от штиля к ветровому волнению // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1992.—28, № 4.—С. 424—431.
 18. Bass F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I., et al. Very High Frequency Radiowave Scattering by a Disturbed Sea Surface, Parts I and II // IEEE Trans. Antennas and Propag.—1968.—AP-16.—P. 554—568.
 19. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glimmer // J. Opt. Soc. Amer.—1954.—44, N 11.—P. 838—850.
 20. Hughes B. A., Grant H. L., Chappell R. W. A fast response surface-wave slope meter and measured wind-waves components // Deep-Sea Res.—1977.—24, N 12.—P. 1211—1223.
 21. Kalmykov A. I., Pustovoytenko V. V. On polarization features of radiosignals scattered from the sea surface at small grazing angles // J. Geophys. Res.—1976.—81, N 11.—P. 1961—1964.
 22. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., et al. A semi-empirical model of the normalized cross-section of the sea surface. 1. Background model // J. Geophys. Res.—2003.—108C, N 3.—FET2 1-24.
 23. Longuet-Higgins M. S. On the skewness of sea-surface slopes // J. Phys. Oceanogr.—1982.—12.—P. 1283—1291.
 24. Stoffelen A., Anderson D. Scatterometer data interpretation: Derivation of the transfer function CMOD4 // J. Geophys. Res.—1997.—102C, N 3.—P. 5767—5780.
 25. Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves. A Review // Boundary Layer Meteorology.—1978.—13, N 1-4.—P. 61—85.
 26. Wright J. W. A new model for sea clutter // IEEE Trans. Antennas and Propag.—1968.—AP-16.—P. 217—223.

ON RATIO BETWEEN THE SPECULAR AND BRAGG COMPONENTS SCATTERED BY THE QUASI-GAUSSIAN SEA SURFACE

A. S. Zapevalov, K. V. Pokazeev, V. V. Pustovoytenko

The ratio between the specular and Bragg components in the reflected radio signal is analysed on the basis of well-known models for scattering and measurement data of sea surface slopes. The measurements were carried out from the Black Sea oceanographic platform with the use of a 2D-slope meter. It is shown that when radiosounding the sea surface, sea surface slope distribution deviation from the Gaussian distribution appear mainly at radio-wave incidence of up to 15°. Taking into account the quasi-Gaussian character of slope distribution leads to a change in the incidence domain, in which the specular component dominates the Bragg component by 1...2°.

УДК 581.17:582.34

О. Т. Демків¹, Е. Л. Кордюм²,
Я. Д. Хоркавців¹, М. Г. Таїрбеков³

¹Інститут екології Карпат НАН України, Львів

²Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Київ

³ДНЦ РФ — «Інститут медико-біологічних проблем» РАН, Москва, Росія

УМОВИ МІКРОГРАВІТАЦІЇ — ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА БАЗА ДЛЯ ПІЗНАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ МОРФОГЕНЕЗУ РОСЛИН В ГРАВІТАЦІЙНОМУ ПОЛІ

Надійшла до редакції 03.04.06

В умовах реальної мікрогравітації в космічному польоті виявлено спіральний ріст гравічутливих протонем моху *Ceratodon purpureus*. Показано, що спіралізації столонів передує диференціація каулонеми з косими клітинними перетинками та відхилення ростової зони апікальної клітини від горизонтальної осі росту. Нахил клітинних перетинок дає можливість верхівковій клітині обергатися навколо поздовжньої осі, долати опір субстрату і гравітації та закручуватися. На підставі досліджень росту протонеми *C. purpureus*, *Burkula unguiculata* і *Physcomitrella patens* в умовах звичайної гравітації, мікрогравітації та клиностатування при різних умовах освітлення та складі поживного середовища встановлено, що морфогенез протонеми регулюється насамперед ендогенними чинниками, дія яких на Землі маскується гравітацією або світлом.

У 1996 р. в експерименті «Протонема» на борту російського біосупутника «Біон-11» вперше виявлено спіральний ріст протонеми моху *C. purpureus* [2]. На відміну від негативного гравітропного росту в темряві в земних умовах, коли нитки протонеми росли майже паралельно одна до одної, в умовах мікрогравітації формувалися дернинки у вигляді лопатей турбіни, або ж «зоряних туманностей». Пізніше ці дані були підтвердженні експериментами з мохами на борту космічних кораблів США у 87-й та 107-й місяцях [9, 10], але закономірності переходу лінійного росту у спіральний пока що не розкриті. Тому ми поставили за мету дослідити вплив зміненої гравітації (реальної та симульованої клиностатуванням) у поєднанні з різними умовами освітлення та складом поживного середовища на характер росту і спіральність протонеми мохів.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Стерильні культури протонеми мохів *Ceratodon purpureus*, *Physcomitrella patens* і *Barbula unguiculata* отримували в лабораторних умовах. Відбирали дозрілі коробочки, стерилізували їх 1 хв 0.1 % суплемою, відмивали у дистильованій воді і висівали спори на агаризоване поживне середовище Кнопа у чашки Петрі. Чашки ставили у фітотрон, і протонему вирощували у конт-

рольованих умовах освітлення 2.0—2.5 тис. лк, температури 20—22 °C і вологості 85—90 %. Семиденні дернинки протонеми знімали з агару препарувальною голкою і у вигляді клубка розміром 0.2 мм переносили на свіже середовище з 0.15 % глюкозою. Чашки поміщали у чорні картонні коробки і для гравістимуляції протонеми ставили їх вертикально. У такому положенні протонема росла негативно гравітропно пучком паралельних ниток протягом 7 діб.

Для дослідження спірального росту в умовах зміненої гравітації проводили наземні експерименти із застосуванням клиностата та космічний, спільно з ДНЦ РФ «Інститут медико-біологічних проблем РАН», на борту російського супутника «Фотон» (червень, 2005 р.). Чашки з протонемою переносили на горизонтальний клиностат, де вони обертались зі швидкістю 2 об./хв, та доставляли на борт супутника, зберігаючи їхнє вертикальне положення.

B. unguiculata у темряві вирощували на середовищі Гамбурга [1], а на свіtlі, як і для *C. purpureus* та *P. patens*, — на агаризованому середовищі Кнопа з 15 М глюкозою (або без глюкози). Через те що *B. unguiculata* не реагувала на клиностатування, розвиток протонеми та форму дернинки аналізували лише залежно від умов освітлення та складу поживного середовища. Для клиностатування використовували *C. purpureus* і *P. patens*, у космічному експерименті — *C. purpureus* [2]. Через 14 діб після завершення дослідів (симульована та реальна мікрогравітації) протонему фіксували 3.7 % параформальдегідом і зберігали у фосфатному буфері pH 6.9 у холодильнику при температурі $t = 0—5$ °C. Дернинки фотографували у стереомікроскопі «Stemi-2000» цифровим фотоаппаратом Nikon Coolpix 4500. Аналізували форму дернинок та напрям клітинних перетинок апікальних і субапікальних клітин.

Досліджували вплив освітлення, фітогормонів, глюкози і азотокислого амонію на швидкість росту, галуження столонів, диференціювання каулонеми та спіральний ріст дернинок. У середовище, на якому у темряві росла протонема, додавали нафтилоцтову кислоту (НОК) у концентрації 1.0 мкM, глюкозу 0.15 M та NH_4NO_3 (6.0 mM). Ступінь спіралізації дернинок оцінювали за кількістю дугоподібних столонів у дернинці. Слідкували за появою косих перети-

нок, підраховували кількість каулонемних столонів і галузок на столонах. Отримані кількісні дані опрацьовували статистично [5].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Нитчастий гаметофіт мохів формується з двох типів столонів — хлоронеми і каулонеми. Клітини хлоронеми *C. purpureus*, *B. unguiculata* і *P. patens*, як і інших видів мохів, фотосинтетично активніші завдяки численним хлорoplastам, тоді як каулонема сприяє розширенню меж дернинки завдяки радіальному і спіральному росту. Відомо, що баланс між хлоронемою і каулонемою залежить від інтенсивності світла та балансу фітогормонів. Утворення каулонеми стимулюють високі інтенсивності освітлення, глюкоза і ауксин, але інгібують цитокініни [8, 17].

У гравітаційному полі в наземних експериментах протонема *C. purpureus*, *P. patens* і *B. unguiculata* росте у темряві негативно гравітропно. Досліди з гравістимуляції протонеми виявили, що види, використані у роботі, неоднаково гравічували. Найбільш гравічувливо є хлоронема *C. purpureus*, столони якої через 6 год після гравістимуляції у темряві утворювали згину у 40° (див. кольорову вклейку, рис. VI, а). *B. unguiculata* дещо повільніше реагувала на дію гравітації, і за такий самий час кут згину хлоронемних і каулонемних столонів дорівнював 30°. У *P. patens* гравічувливими переважно є ризоїди і каулонемні, а не хлоронемні столони, які згинаються за 6 год гравістимуляції на 30°.

На свіtlі протонема *C. purpureus* росте плагіотропно, дернинка має симетрично круглу форму, радіальні столони не вигинаються, і після диференціювання каулонеми напрям росту протонеми і форма дернинки не змінюються. Інтеркалярні клітини протонеми галузяться, і новоутворені бокові столони також ростуть радіально. окремі каулонемні столони на свіtlі не ростуть дугоподібно, тому форма дернинки залишається радіальною. Дернинка *P. patens*, яка утворилася на свіtlі, теж має радіальну форму, але згодом кінці головних столонів згинаються в той або інший бік (рис. VI, б, в). Бокові галузки також ростуть спочатку прямолінійно, а потім, як і

головні столони, загинаються в один бік, і дернинка набирає спірального вигляду. На дуго-подібних головних столонах розвиваються лист-костеблові гаметофори (рис. VI, в). Протонема *B. unguiculata* добре розвивається на світлі, головні столони відразу відхиляються дуговидно і згодом утворюють синхронні спіральні згини, направлені проти годинникової стрілки (рис. I, г). Дернинка має чітко виражену спіральну форму. Якщо у середовище додавали глюкозу, то столони росли протилежно, ніж без глюкози — за стрілкою годинника. Азотнокислий амоній істотно не впливав на характер згинів, але пришвидшував процес спіралізації дернинки, очевидно, стимулюючи диференціювання каулонеми. Не спостерігалося активації галуження і утворення столонів.

У дернинках всіх досліджуваних видів, які виросли на світлі, можна виділити центральну і латеральну частини. Центральна частина дернинки складається з ниток хлоронемного типу, які щільно прилягають одна до одної, а поза її межі вибігають окремі каулонемні столони, які утворюють латеральну зону. У *B. unguiculata* і *P. patens* якраз ці столони ростуть дуговидно. Столони з латеральної частини дернинки галужаться, з галузок виростають бокові столони, які теж закручуються, і завдяки зміні напряму росту дернинка набуває спіральної форми.

У темряві в гравітаційному полі протонема всіх видів мохів, як вже відмічалося, виявляла негативний гравітропізм. Після перенесення негативно гравітропної протонеми в умови реальної мікрогравітації або клиностатування напрям росту столонів різко змінювався. Під час клиностатування у темряві дернинки *C. purpureus* росли спірально, і столони загиналися в один бік — за годинниковою стрілкою. Дернинка *C. purpureus* виглядала як зоряна спіральна туманність завдяки тому, що загиналися всі столони — головні і бокові. Частина гравітропних столонів, зокрема крайніх, відхилялася від вертикальної осі росту. Після диференціювання каулонеми з обох боків від пучка ниток утворювалися гвинтовидні спіралі столонів з виявленим латеральним гравітропізмом (рис. VI, д), які закручувалися у різні боки, так що дернинки мали віяло-подібний вигляд (рис. VI, е). Спіральні дернинки утворювалися незалежно від напряму ротації клиностата (за чи проти годинникової стрілки).

Подібні спіральні дернинки *C. purpureus* утворювалися в умовах реальної мікрогравітації в космічному польоті (рис. VI, ж).

Спіральна форма дернинки *P. patens* під час клиностатування формувалася завдяки згинам лише головних столонів. Бокові столони *P. patens* росли повільно, тому головні отримували перевагу — швидше росли, скоріше відбувалося диференціювання каулонеми і розпочинався дуговидний ріст. Протонема *B. unguiculata* на клиностаті в темряві не утворювала спіральних структур, а росла радіально. Лише на світлі столони згиналися дуговидно, і морфологічно дернинка *P. patens*, яка сформувалася на світлі, і дернинка *C. purpureus*, що виросла у темряві, виглядали однаково.

Передумовою спірального росту є диференціювання каулонеми. Особливістю каулонемних клітин є те, що змінюються нахил клітинної стінки з перпендикулярного на косий. З цього розпочинається переорієнтація прямолінійного росту столонів протонеми на дуговидний спіральний. Дослідження диференціювання протонеми різних видів мохів свідчать, що для конверсії хлоронеми у каулонему необхідні певні умови. Каулонема не утворюється при низькій освітленості (500 лк), низькій температурі (5°C або менше), у рідкому середовищі і т. д. [4, 10]. Для нормального диференціювання протонеми у темряві використовують енергетично забагачене 0.15 М глюкозою середовище ВСЕ або Кнопа [3, 10]. Відомо також, що низькі концентрації ауксину регулюють розвиток каулонеми [8]. Поміж зазначених факторів, важливими для диференціювання протонеми є кількість клітин і погалужень столонів. Очевидно, що клітини виділяють у субстрат речовини, можливо гормони чи ферменти, які підсилюють диференціювання протонеми.

Виходячи з цього, досліджувався вплив світла, глюкози і ауксину на диференціювання каулонеми та галуження клітин головних столонів. Для експерименту використано *B. unguiculata*, тому що протонема цього виду серед інших досліджуваних видів найкраще утворює спіральні структури на світлі. Як і слід було сподіватися, низькі інтенсивності освітлення (6 мкмоль· $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) стимулювали утворення хлоронеми та затримували диференціювання каулонеми, хоча на субстраті з 0.15 М глюкозою

утворювалися каулонемні столони. Кількість каулонемних столонів інтенсивно зростала на високих інтенсивностях освітлення ($30 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$) та під впливом глюкози (рис. 1). Внесення у середовище 1.0 мкМ НОК підвищувало кількість каулонемних столонів у дернинці до 35% порівняно з 20% у контролі. Але порівняно із

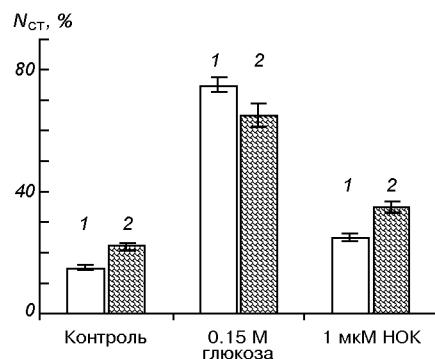


Рис. 1. Кількість N_{ct} утворених каулонемних столонів *Burbula unguiculata* при різних умовах освітлення: 1 — $6 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$, 2 — $30 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$

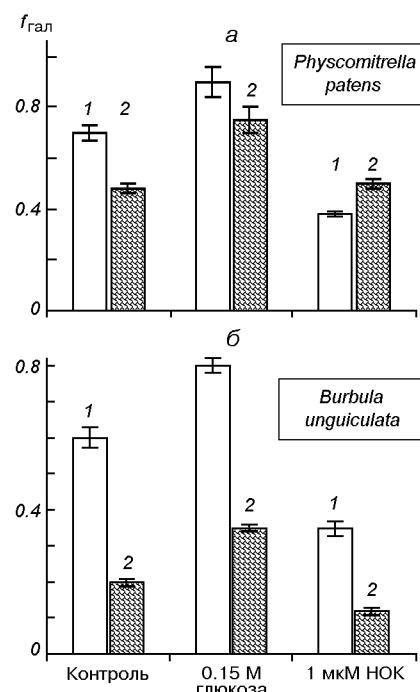


Рис. 2. Частота f_{gal} утворення хлоронемних галузок під час галуження протонеми *Physcomitrella patens* (а) і *Burbula unguiculata* (б): 1 — галуження головних столонів, 2 — бокових столонів протонеми

випадком стимулювання глюкозою каулонемних столонів було набагато менше. Отже, ауксин і глюкоза більше стимулювали диференціювання каулонеми на високих інтенсивностях освітлення і менше на низьких.

Дернинка може нарости не лише за рахунок приросту довжини головних столонів, її розміри також збільшуються внаслідок галуження інтеркалярних клітин протонеми. Частота галуження і довжина бокових столонів змінюється залежно від умов вирощування. Для того щоб визначити, як галуження залежить від екзогенних чинників, ми проаналізували вплив глюкози і НОК на утворення і ріст галузок. Результати впливу 0.15 M глюкози і 1.0 мкМ НОК на галуження головних каулонемних столонів і бокових хлоронемних наведено на рис. 2. Використано низку інтенсивність освітлення, тому що на $30 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$ глюкоза і ауксин майже не впливали, або й інгібували частоту галуження і ріст бокових галузок. Як бачимо з рис. 2, головні столони *B. unguiculata* і *P. patens* у контролі галузяться дуже інтенсивно, глюкоза ще більше посилює галуження, а ауксин, навпаки, знижує темп галуження. Зате частота галуження бокових столонів *B. unguiculata* і *P. patens* відрізнялася. Інтенсивніше галузки закладалися у *P. patens*. Відповідно глюкоза і ауксин стимулювали їхнє галуження більше, ніж *B. unguiculata*. Спочатку бокові відгалуження росли радіально, але потім апікальні клітини починали закручуватися, утворювалися витки столонів, досить густі, що посилювало виразність спіралізації дернинки обох видів.

Крім частого галуження головних столонів *B. unguiculata* і *P. patens*, закладаються галузки і на довгих зігнутих столонах (100—120 клітин) переважно на одній опуклій стороні столону, тоді як на прямих столонах, котрі росли радіально, галузки формувалися почвергово з обох боків. Столони з опуклої сторони росли відразу спірально. Але у *P. patens* частіше спіральні витки утворюють довгі, а у *B. unguiculata* — короткі столони (10—15 клітин), яких значно більше, ніж довгих. 90 % бокових хлоронемних галузок *B. unguiculata* і *P. patens* росли поволі, їхня довжина сягала $50 \pm 0.4 \text{ мкм}$, і лише 10 % столонів мали довжину $170 \pm 9.2 \text{ мкм}$. Тому морфологічна форма і ступінь спіралізації дернинок обох видів відрізнялася.

Чутливість апікальних клітин до гравітації виникає на різних стадіях диференціювання протонеми і неоднакова у різних видів. У *C. purpureus* гравічутливості є хлоронема, у *Funaria hygrometrica* і *B. unguiculata* — каулонема, у *P. patens* гравітропно ростуть ризоїди і каулонема. Отже, стадія каулонеми є обов'язковою умовою спірального росту і гравічутливості, але виконує неоднакову роль у морфогенезі різних видів. У гравітаційному полі в умовах освітлення столони дернинки стеляться по поверхні субстрату, радіально, формуючи симетричні дернинки, а після диференціювання каулонеми і формування бруньок гаметофорів синхронно закручуються у вигляді спіралей. Вперше спіральні дернинки для протонеми *F. hygrometrica*, *Fissidens bryoides*, *B. unguiculata*, *Pottia truncata*, *Bryum spinosum*, *Dicranum scoparium* і *Polytrichum sp.* описали М. Бопп і Л. Кофлер [7, 13, 14], а згодом А. С. Лазаренко із колегами [4]. Протонема одних видів, наприклад *P. patens*, загинається за годинниковою стрілкою, а *B. unguiculata* — проти стрілки годинника, але за інших умов нахил спіралі може змінитися на протилежний. Л. Кофлер вважав [14], що причиною спіралізації протонеми є гравітація, і ніякі ендогенні фактори не беруть участі у цьому явищі. Гравітація відіграє важливу роль у спіралізації, але у поєднанні із світлом. М. Бопп [7] вказував, що орієнтація спіралі залежить від напряму та інтенсивності освітлення. Однак зміна орієнтації спіралі під впливом низьких концентрацій глюкози означає, що напрям визначається екзогенно шляхом морфогенетичної дії гексокінази [14]. Е. Синнот [6] допускав, що спіральність ініціюється нахилом клітинної перетинки під час поділу апікальної клітини. Експериментально встановлено, що передумовою спірального росту мохів є диференціювання каулонеми з косими міжклітинними перетинками. Наявність косих перетинок свідчить про те, що апекс апікальної клітини поступово зміщується, а його напрям може визначатися нахилом веретена під час першого клітинного поділу. Припускається, що організація тубулінових елементів цитоскелету в апікальних клітинах може змінюватися під впливом гравітації чи фітогормонів [16]. Ми показали, що клітини спіральних столонів каулонеми після клиностатування мають довгі товсті тяжі мікротрубочок (МГ), які розмі-

щуються паралельно до клітинної стінки [9, 12]. Тобто, спіральна форма клітин каулонеми супроводжується такою ж орієнтацією МГ. С. Тітамаді зі співробітниками припускають, що МГ якимось чином включаються у спіральний ріст і можуть бути частиною механізму контролю за формою росту клітин кореня *Arabidopsis* [18].

У темряві саме через відсутність світла ріст протонеми відбувається строго в одному напрямі — негативно гравітропно. В умовах мікрогравітації або клиностатування нитки сформованого негативно гравітропного пучка «розбігаються» у різні сторони та закручуються [2, 11]. На нашу думку, між окремими столонами протонеми є взаємовпливи, які на фоні поляризаційної дії гравітації морфологічно не проявляються. Крім такої взаємодії, відомої як «груповий ефект», певну роль у цьому явищі може відігравати електрична поляризація клітин протонеми мохів [3]. Поверхня інтеркалярних клітин протонеми заряджена позитивно і розходження столонів може зумовити відштовхування однайменних зарядів.

Чи можна радіальний і спіральний ріст пояснити автономними програмами апікальних клітин або протонеми взагалі? Позитивну відповідь на це питання дають проведені нами лабораторні експерименти, в яких формування спіральних структур у *B. unguiculata* відбувалося на свіtlі в умовах нормальній гравітації, а у *C. purpureus* у темряві в умовах клиностатування, та унікальні космічні експерименти в умовах реальної мікрагравітації, в яких спіральні дернинки формувалися при відсутності гравітації та світла, тобто виявляли автономність спірального росту від дії гравітації та світла.

Одержані дані свідчать про спадковий характер морфогенезу дернинок мохів та наявність ендогенних регуляторів росту протонеми, прояв яких маскується в земних умовах гравітацією та світлом.

1. Бутенко Р. Г. Культура изолированных тканей и физиология морфогенеза растений. — М.: Наука, 1964.— 272 с.
2. Демків О. Т., Кордюм Е. Л., Таїрбеков М. Г. та ін. Гравіморфогенез протонеми листяних мохів // Доп. НАН України.—1998.—№ 7.—С. 163—166.
3. Демків О. Т., Федык Я. Д. Полярность клеточной проницаемости и ее контроль фитохромом // Біофізика.—1977.—22, 5.—С.

4. Лазаренко А. С., Коваленко А. П., Пашук Х. Т. Деякі спіральні структури протонеми листяних мохів // Укр. ботан. журн.—1961.—18, № 6.—С. 89—98.
5. Лакин Г. Ф. Біометрія. — М.: Вищ. шк., 1990.—352 с.
6. Синнот Э. Морфогенез растений. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963.—603 с.
7. Bopp M. Versuche zur Analyse von Wachstum und Differenzierung des Laubmoosprotonemas // *Planta*.—1959.—53.—S. 178—197.
8. Bopp M. Developmental Physiology of Bryophytes // New Manual Biology / Ed. R. M. Schuster. — The Hattori Bot. Lab. Nichinan, 1983.—P. 276—324.
9. Demkiv O. T., Khorkavtsiv Ya. D. Pundiak O. I. Changes of protonemal cell growth related to cytoskeleton organization // *Cell Biology International*.—2003.—27, N 3.—P. 187—189.
10. Kern V. D., Sack F. D. Irradiance-dependent regulation od gravitropism by red light in protonemata of the moss *Ceratodon purpureus* // *Planta*.—1999.—209.—P. 299—307.
11. Kern V. D., Schwuchow J. M., Reed D. W., et al. Gravitropic moss cells default to spiral growth on the clinostat and in microgravity during spaceflight // *Planta*.—2005.—221.—P. 149—157.
12. Khorkavtsiv O. Ya., Kardash O. R. Gravity-dependent reactions of the moss *Pohlia nutans* // *Adv. Space Res.*.—2001.—27, N 5.—P. 989—993.
13. Kofler L. Croissance spiralee du protonema de *Funaria hygrometrica* (L.) Sibth. — Paris: C. R. Acad. Sci., 1957.—245.—P. 1823—1825.
14. Kofler L. Contribution a l'etude biologique de mousses cultivees in vitro: germination de spores, croissance et developpement du protonema chez *Funaria hygrometrica* // Revue Bryol. Lichen.—1959.—28, N 1-2.—P. 1—202.
15. Nick P. Signaling to the microtubular cytoskeleton un plants // *Int. Rev. Cytol.*.—1998.—184.—P. 140—144.
16. Moore B., Zhou L., Rolland F., et al. Role of the *Arabidopsis* glucose sensor *HXK1* in nutrient, light and hormonal signalling // *Science*.—2003.—300.—P. 332—336.
17. Reski R. Development, genetics and molecular biology of mosses // *Bot. Acta*.—1998.—111.—P. 1—15.
18. Thitamadee S., Tuchihara K., Hashimoto T. Microtubule basis for left-handed helical growth in *Aradidopsis* // *Planta*.—2002.—417.—P. 193.

MICROGRAVITY IS THE EXPERIMENTAL BASIS FOR UNDERSTANDING OF THE PECULIARITIES OF PLANT MORPHOGENESIS IN THE GRAVITATIONAL FIELD

*O. T. Demkiv, Ye. L. Kordyum, Ya. D. Khorkavtsiv,
M. G. Tairbekov*

Spiral growth of the gravisensitive protonema of *Ceratodon purpureus* moss is revealed in real microgravity during space flight. Caulonema differentiation with oblique cell partitions and deviation of an apical cell growth zone from the growth horizontal axis were shown to precede the stolon spiralization. The slope of subapical cell walls enables an apical cell to revolve on its long axis, overcome the substrate and gravity resistance, and become twisted. Investigations of *C. purpureus*, *Burbula unguiculata* and *Physcomitrella patens* protonema growth in the conditions of 1 g, real and simulated microgravity (clinorotation) in darkness and under different light intensity and nutrient medium composition show that protonema morphogenesis is above all regulated by endogenous signals, action of which is concealed by gravity or light on the Earth.

UDC 579.65

I. Zaets^{1,3}, T. Voznyuk¹, M. Kovalchuk¹, I. Rogutskyy², D. Lukashov³,
O. Mytrokhyn³, S. Mashkovska⁴, B. Foing⁵, N. Kozyrovska¹

¹Institute of Molecular Biology and Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
E-mail: kozyr@imbg.org.ua

²Institute of Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³T. G. Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

⁴National Botanical Garden of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁵ESA Research and Scientific Support Department, ESTEC/SCI-SR, Postbus 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands

Optimization of plant mineral nutrition under growth-limiting conditions in a lunar greenhouse

Received 13.03.06

It may be assumed that the first plants in a lunar base will play a main role in forming a protosoil of acceptable fertility needed for purposively growing second generation plants like wheat, rice, tulips, etc. The residues of the first-generation plants could be composted and transformed by microorganisms into a soil-like substrate within a loop of regenerative life support system. The lunar regolith may be used as a substrate for plant growth at the very beginning of a mission to reduce its cost. The use of microbial communities for priming plants will allow one to facilitate adaptation to stressful conditions and to support the plant development under growth limiting conditions. Well-defined plant-associated bacteria were used for growing three cultivars to colonize French marigold (*Tagetes patula* L.) in anorthosite, a substrate of low bioavailability, analogous to a lunar rock. The consortium was composed of plant growth promoting rhizobacteria and the bacterium *Paenibacillus* sp. IMBG156 which stimulated seed germination, better plant development, and finally, the flowering of inoculated tagetes. In contrast, control plants grew poorly in the anorthosite and practically did not survive until flowering. Analysis of bacterial community composition showed that all species colonized plant roots, however, the rate of colonization depended on the allelopathic characteristics of marigold varieties. Bacteria of consortium were able to liberate some elements (Ca, Fe, Mn, Si, Ni, Cu, Zn) from substrate anorthosite. Plant colonization by mixed culture of bacterial strains resulted in the increase of accumulation of K, Mg, Mn by the plant and in the lowering of the level of toxic metal accumulation. It was assumed that a rationally assembled consortium of bacterial strains promoted germination of marigold seeds and supported the plant development under growth limiting conditions by means of bioleaching plant essential nutritional elements and by protecting the plant against hyperaccumulation of some toxic metals.

THE PROTOTYPE PLANT-BACTERIA MICROCOSM FOR A LUNAR BASE

The ability to grow plants in space self-perpetuating gardens is topical for providing an advanced life support system for humans while inhabiting a permanently manned lunar base (PMLB). Plants could provide fresh food, oxygen, and clean

water for explorers living in PMLB. A lunar garden has to supplement less appetizing packaged food brought from the Earth. The ornamental plants will play a role in reducing stress and in recovering emotional potency in PMLB personnel. Lunar agriculture has the potential to earn the needed export of fresh food to other space locations at a decided fiscal advantage over fresh products brought up

from the Earth. To reduce a cost of early missions to the Moon, it would be practical to use local materials such as a lunar regolith for growing plants in lunar greenhouses. The use of bacteria to govern a decomposition of silicate rocks, a liberation of essential growth elements for plants, and to deliver them to the plant is a key idea in precursory scenario of growing pioneer plants for a lunar base [5–7]. The objectives of this study were to study bioleaching capacity of bacteria in batch experiments with anorthosite as a component of nutrient media, as well as in the model plant microcosms placed in plant growth chambers under controlled conditions.

The prototype plant. The ornamental plant French marigold (*Tagetes patula* L.), undemanding to growth conditions, has been chosen as a model plant system to demonstrate growth of plant with minimal expenses. The plant produces acceptable biomass which could be converted by microorganisms into a fertile protosoil assigned for growing first industrial plants. In future stages of lunar agroindustry, the marigold may be applied to recover a tired plant-growing environment by producing secondary metabolites (allelochemicals) [10]. Beside the pragmatic side, the marigold could perform a role in esthetic decoration of the hostile environment of PMLB: the beautiful image and delicate fragrance of marigold cultivars, familiar to everybody and lovely, would remind of an earthly spirit to habitants of PMLB and, accordingly, correct the emotional comfort of lunar explorers. Marigold flowers are consumed widely as aromatic tea, and this experience could be proposed to be used at PMLB in prophylactics of various diseases and protection from irradiation, to release pain [4, 18, 19]. Both marigold flowers and leaves are excellent spices that could appetize tasteless packaged food and in that way supply it with vitamins and microelements [11]. The set of these traits makes marigold a promising candidate for pioneer plant of multipurpose application at lunar base. In these experiments a middle-sized cultivar Carmen and two dwarf cultivars, Petite Harmony and Petite Gold, served as the plant-hosts for a consortium of plant growth promoting rhizobacteria.

The model consortium of bacteria. The rationally assembled bacterial community — *Pseudomonas* sp. IMBG163, *Pseudomonas aureofaciens*

IMBG164, *Paenibacillus* sp. IMBG156, *Klebsiella oxytoca* IMBG26, and *Pantoea agglomerans* IMV56 — aims to support plant growth in a substrate of low bioavailability using several mechanisms: priming resistance in plant to stresses, stimulating seed germination by providing phytohormones, improving nutrition by leached or biologically fixed elements, “cleaning” plant environment, etc. Cultures of bacterial strains were applied for seed inoculation, except *Paenibacillus* sp., which was introduced into a substrate. Model consortium of bacteria needs both organogenic elements N, P, C, O and additional elements essential for physiological activity like K, Na, Mg, Ca, Fe, etc., as well as microelements. In accordance with the idea of cultivating healthy crops in a lunar garden using low-cost technology, in these experiments bacteria were not provided with nutrients, except a water or 1 mM solution of potassium phosphate (PP).

The analogs of a lunar rock. The lunar highland regolith is predominantly composed of aluminosilicate basic rocks, mainly anorthosites, noritic anorthosites, and gabbroic anorthosites [2]. The primary rock-forming minerals of lunar anorthosites are calcic plagioclase $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$, pyroxene (Mg, Fe, Ca)(Mg, Fe) $[\text{Si}_2\text{O}_6]$, and olivine (Mg, Fe) $[\text{SiO}_4]$. Therefore, the plant could get the majority of elements essential for nutrition from the regolith, and the rest of it by lunarsourced additions. The terrestrial anorthosites are usual rocks within the Precambrian Shields, for example, within the Ukrainian Shield. There are some differences between terrestrial and lunar anorthosites [2]. While the first are “dry”, some earth rocks contain hydrated minerals. Another difference could be the absence of hydrocarbons. Despite these differences, terrestrial anorthosites may serve as simulants of lunar rocks in model experiments on plant cultivation under growth limited conditions. The Turchynka type anorthosite is composed of plagioclase (Ca, Na) $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$, pyroxene of low calcium content, and olivine. The Penizevitchi anorthosite in addition to intermediate plagioclase, low-calcic pyroxene and olivine, contains minor quantities of ilmenite FeTiO_3 , orthoclase $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$, biotite $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$, and apatite $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$ [12]. These types of anorthosites appeared to be a poor support of marigold growth, and the idea was to use natural bacterial

residents of alumino-silicate rocks to leach the plant essential ions from a substrate and therefore to improve plant development [5]. The anorthosite of Turchynka deposit (Korosten Pluton, Ukraine) [9, 12], chemically and mineralogically similar to lunar anorthosites was used in model microcosms as the substrate for plant growth.

The marigold growing in anorthosite. In our earlier experiments [5, 7] we observed a poor survival of marigolds in intact, the first-time-used anorthosite. In this research we re-used the substrate after sterilization, and marigold seed germination in such a substrate has been at the same level. However, control plants did survive in anorthosite, and they had a comparable level of survival with the inoculated marigolds. Nevertheless, inoculated marigold sprouts differed from control variants by a higher biomass, better branching of stems, and in more green color of leaves (see colour Fig. VII). Application of mixed populations of bacteria for seed inoculation resulted in 100 % seed germination and survival of sprouts in anorthosite. In contrast, watered seeds survived in 20–30 %, even when potassium and phosphorus were added to microcosm. After a period of 54 ± 3 days of co-cultivating the French marigold with the consortium of bacteria, the plant began to flower. The noninoculated plants flowered 5–7 days later. There was practically no difference between varieties tested in survival rate and in duration of the period before flowering. As compared to plants grown in the soil, inoculated tagetes began to flower 5–6 days later in anorthosite and produced 4.3 time less dry biomass compared to plants

grown in a fertile soil. Inoculated plants gained 1.8-time higher dry weight as compared to control plants that accidentally survived in anorthosite at an age of 4 weeks (Table 1).

The survival of bacteria in the marigold rhizosphere was tested in three cultivars with different allelopathic traits. There were no shifts in community composition in the roots of the Carmen cultivar within 6 weeks when plants were supplied by a PP solution or distilled water, in spite of putative deficit of nutrients in microcosms. At the beginning of the examination period, the *Paenibacillus* sp. IMBG156 came on roots from substrate anorthosite and generated a small-size population on the plant, and later, after 2 weeks, it was getting to rise the population rapidly to $\log 8/g$ of fresh roots [6, 7]. The partners of *Paenibacillus* were rather competitive on the marigold roots and gained the $\log 6\text{--}7$ populations. In contrast, the roots of the dwarf marigold cultivars were less colonized by the bacterial assemblage. Total number of bacteria per gram of Petite Harmony root did not exceed $\log 7$, and the most active colonizers were *Paenibacillus* sp. IMBG156 and *P. aureofaciens* IMBG164. Poor survival of some bacterial species on the dwarf marigold roots correlated with a higher rate of phenolcarboxylic acids produced by plants which appeared to inhibit bacterial growth [10]. It was concluded that Carmen cultivar was more suitable than dwarfs for further experiments.

Bioleaching anorthosite by *Paenibacillus* sp. IMBG156 and by consortium of bacteria. Siliceous bacteria as well as other microorganisms

Table 1. Accumulation of elements from anorthosite by inoculated tagetes, $\mu\text{g/g}$

Elements	Anorthosite, control	Anorthosite, <i>Paenibacillus</i> sp.	Anorthosite, consortium	Soil, control	Soil, <i>Paenibacillus</i> sp.	Soil, consortium
Dry weight, g/plant	0.031 ± 0.008	0.035 ± 0.002	0.056 ± 0.008	0.238 ± 0.010	0.248 ± 0.030	0.221 ± 0.050
Zn ⁺²	80.4 ± 14.3	30.1 ± 10.4	29.4 ± 6.5	69.4 ± 4.0	58.2 ± 11.4	71.0 ± 2.7
Mn ⁺²	306 ± 86	384 ± 81	423 ± 62	601 ± 4	520 ± 140	835 ± 104
Fe ⁺³	340 ± 17	143 ± 42	81 ± 13	95 ± 0	70 ± 22	75 ± 3
Ni ⁺²	27.2 ± 3.1	13.6 ± 0.1	14.2 ± 3.9	3.1 ± 0.5	5.1 ± 0.9	6.6 ± 2.7
Cr ⁺³	35.4 ± 11.8	3.1 ± 1.4	18.0 ± 5.5	2.7 ± 3.0	1.9 ± 1.1	2.0 ± 2.2
Co ⁺²	< 0.5	2.6 ± 0.9	1.5 ± 0.4	0.6 ± 0.1	0.9 ± 0.5	1.3 ± 1.1
Ca ⁺²	179050 ± 51548	81505 ± 3279	63373 ± 13435	61710 ± 5882	57392 ± 7855	55966 ± 7419
Mg ⁺²	1752 ± 469	3005 ± 652	1786 ± 421	8940 ± 1560	8493 ± 2574	9604 ± 382
Na ⁺	1162 ± 71	678 ± 148	383 ± 23	451 ± 76	435 ± 63	373 ± 58
K ⁺	19551 ± 1948	20629 ± 2285	23705 ± 2780	12747 ± 1443	15010 ± 2870	14850 ± 2335

could be used for bioleaching the lunar regolith in a program of growing pioneer plants. Some species of *Bacillus/Paenibacillus* and *Pseudomonas* genera are known as destructors of alumino-silicates [1, 13]. In this respect *Paenibacillus* sp. IMBG156, isolated from a silica rock, has been chosen as the model bacterium in the simulation of bioleaching anorthosite. In batch experiments with monoculture, *Paenibacillus* sp. IMBG156 cells attached to anorthosite fragments and changed electrokinetic potential of the rock surface apparently due to exopolysaccharide (EPS) capsule [5]. *Paenibacilli* caused the corrosion of anorthosite resulted from formation of iron(III) oxide of the rock within 28 days of incubation in the presence of the Pinizevitchi anorthosite fragments. No signs of changes on the anorthosite surface were observed in the variant without bacteria. Cultural media were examined by flame atomic adsorption spectrophotometry using C115-M1 (Selmi, Ukraine). SiO_3^{2-} was detected with the colorimetric method. The results represented in Table 2 show that strain IMBG156 as well as the consortium of bacteria were able to deliberate Fe^{+3} , Ca^{+2} , and SiO_3^{2-} from anorthosite under normal pH within the 6-week period of incubation with a rock in a minimal medium. The level of released elements increased 2–8-fold compared to control in both *Paenibacillus* sp. IMBG156 and model bacterial consortium. In a pellet of mixed culture concentration of liberated ions increased 1.5–4.5 times. In contrast to IMBG156, the consortium of bacteria were able to release and accumulate cations of Zn, Mn, Cu and Ni. Results of this series experiments

clearly demonstrated that both monoculture *Paenibacillus* sp. IMBG156 and mixed bacterial culture were able to leach anorthosite.

Bioleaching anorthosite by plant microcosm. The marigold is known to accumulate metal cations [3]. In this study results revealed that *T. patula* cv. Carmen accumulated macroelements K, Ca, Na and microelements Fe, Zn, Ni, Cr in anorthosite substrate in a higher concentration than when grew in a podzol soil (organic matter, 1.2%; pH 6.2; N — 4.3; P — 7.6; K — 8.4 mg in 100 g of a soil) (see Table 1). In association with bacteria, tagetes accumulated more K^+ , Mg^{+2} , Mn^{+2} in anorthosite. Bacteria corrected hyperaccumulation by the plants of Ca, Zn, Fe, Cr, Ni, and in such a way prevented the intoxication by these elements. The consortium of plant root microinhabitants enhanced accumulation of Cr^{+3} in a higher rate than the plant colonizer *Paenibacillus* sp. alone. Bacteria promoted accumulation of Co^{+2} by marigold, and this phenomenon may be connected with a resistance to cations of toxic metals known for some species of bacteria [17], for example, some representatives of *Pseudomonas* and *Klebsiella* genera are tolerant to toxic concentrations of heavy metals [15]. Bacteria have developed a variety of resistance mechanisms to counteract heavy metal stress. These mechanisms include the formation and sequestration of heavy metals in complexes, reduction of a metal to a less toxic species, and the direct efflux of a metal out of the cell [14]. Mobile genetic elements (MGE) are responsible for such activity in some cases [16]. Either deleting MGE or substituting some species

Table 2. Concentration of elements released by bacteria from anorthosite, mg/l

Microcosm	Zn^{+2}	Mn^{+2}	Fe^{+3}	Cu^{+2}	Ni^{+2}	Ca^{+2}	SiO_3^{2-}
Consortium of bacteria*:							
A cultural medium	0.133	0	2.340	0.036	0	1010.000	Not determined
A pellet (bacterial cells)	0.310	0.223	10.129	0.049	0.072	1309.000	Not determined
<i>Paenibacillus</i> sp. IMBG156 (a cultural medium)	0	0	2.250	0	0	1730.000	12.000
Control (a nutrient medium without bacteria)	0	0	0	0	0	1010.000	0.800
Control (a nutrient medium without bacteria and anorthosite**)	0	0	0	0	0	0	0

*Titre of bacteria log 6-7 CFU/ml.

**Anorthosite rocks of the Turchynka type contain (ppm) Fe (46722—75426), Ca (52226—65746), Si (228326—240499), Mn (924—693), Zn (44.0—24.0), Cu (18.2—16.7), Ni (68.8—42.7)

of bacteria, possessing resistance to chromium and cobalt, can resolve the problem with accumulation of undesirable elements.

Analysis of the results of this study shows that inoculated marigold plants have got in full practically all elements, except magnesium and mangan which were in deficit. However, due to bacteria, it was possible to save up to 70 % of needed Mn⁺². Summarizing advantages of marigold inoculations by mono- or mixed culture, we can conclude that application of consortium of bacteria is more profitable than *Paenibacillus* sp. alone.

CONCLUSIONS

In model experiments, the rationally assembled consortium of bacterial strains promoted the growth of *T. patula* L. and supported the plant development under growth limiting conditions by stimulating seed germination (1); bioleaching and delivering essential nutritional elements to the plant (2); preventing intoxication of the plant by excess of metal cations released from anorthosite. Due to the bacterial consortium, the model plant was supplied with an additional amount of basic macro- and microelements. French marigold grown without bacteria appears to be intoxicated by threshold accumulation of some metals, and the presence of bacteria on the plant roots protected it against excessive accumulation of some elements. So, the bacteria were able to correct both hyperaccumulation and deficit of elements needed for plant nutrition. Growing first generation plants such as the French marigold in the presence of a community of microorganisms, including eubacteria, cyanobacteria, mycorrhiza fungi, etc. and converting the plant residues by microorganisms into a soil-like substrate may give the beginning of agro-industry at PMBL, however, bioaugmentation strategy of growing plants for lunar bases needs comprehensive study and a wider body of evidence.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are thankful to O. Nimenko for technical assistance. The project has been fulfilled on a voluntary basis.

1. Alexandrov V. G., Zak G. A. Bacteria, destroying alumosilicates (siliceous bacteria) // *Microbiologia*.—1950.—19.—P. 97—104 (in Russian).
2. Ashwal L. D. Anorthosites. — Springer-Verlag, 1993.
3. Bessonova V. P., Ivanchenko O. E. Iron and chrome excess effect on the activity of nitrate reductase in vegetative organs of *Tagetes patula* L. and *Lathyrus odoratus* L. // *Physiology and Biochemistry of Cultural Plants*.—2004.—36.—P. 511—519 (in Ukrainian).
4. Kasahara Y., Yasukawa K., Kitanaka S., et al. Effect of methanol extract from flower petals of *Tagetes patula* L. on acute and chronic inflammation model // *Phytother. Res.*.—2002.—16(3).—P. 217—222.
5. Kozyrovska N. O., Korniichuk O. S., Voznyuk T. M., et al. Microbial community in a precursory scenario of growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse // *Kosmichna Nauka i Technologiya* (Space Science and Technology).—2004.—10, N 5/6.—P. 221—225 (in Ukrainian).
6. Kozyrovska N. O., Korniichuk O. S., Voznyuk T. M., et al. Growing pioneer plants for a lunar base // *Adv. Space Res.*.—2006.—37, N 1.—P. 93—99.
7. Kozyrovska N. O., Zaetz I., Voznyuk T. M., et al. A rationally assembled microbial community for growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse // *Res. Microbiol.*.—2006.—157.—P. 87—92.
8. Lee S.-W., Glickmann E., Cooksey D. A. Chromosomal locus for cadmium resistance in *Pseudomonas putida* consisting of a cadmium-transporting ATPase and a MerR family response regulator // *Appl. Environ. Microbiol.*.—2001.—67.—P. 1437—1444.
9. Lychak I. L. Petrology of Korosten Pluton. — K.: Naukova dumka, 1983.—248 p. (in Ukrainian).
10. Mashkovska S. P. An accumulation and a role of the volatile oils in forming the allelopathic potential in marigold (*Tagetes* L.) // *Dopovidi Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrayni* (Proc. Nat. Acad. Sci. Ukraine).—2003.—6.—P. 167—170 (in Ukrainian).
11. Mashkovska S. P., Hryhoryuk I. P. Marigolds — a source of effective drugs // *Phytotherapy*.—2003.—4.—P. 41—47 (in Ukrainian).
12. 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.
13. 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.
14. Nies D. H. Microbial heavy-metal resistance // *Appl. Microbiol. Biotechnol.*.—1999.—51.—P. 730—750.
15. Stoppel R.-D., Schlegel H. D. Nickel-resistant bacteria from anthropogenically nickel-polluted and naturally nickel-percolated ecosystems // *Appl. Environ. Microbiol.*.—1995.—20, N 61.—P. 2276—2285.
16. Tibazarwa C., Wuertz S., Mergeay M., et al. Regulation of the *cnr* Cobalt and Nickel Resistance Determinant of *Ralstonia eutropha* (*Alcaligenes eutrophus*) CH34 // *J. Bacteriol.*.—2000.—182.—P. 1399—1409.
17. Trajanovska S., Britz M. L., Bhate M. Detection of heavy metal ion resistance genes in gram-positive and gram-negative bacteria isolated from a lead-contaminated site //

- Biodegradation.—1997.—8.—P. 113—124.
18. Vasilenko Yu., Bogdanov A., Frolova L., et al. Hepato-protective properties of preparations from French marigold // Chimiko-pharmatsevicheskii zhurnal (Chemical and Pharmaceutical Journal).—1990.—N 1.—P. 53—56 (in Ukrainian).
19. Yasukawa K., Akihisa T., Inoue Y., et al. Inhibitory effect of the methanol extracts from compositae plants on 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetate-induced ear oedema in mice // Phytotherapy Res.—1998.—2, N 7.—P. 484—487.

**ОПТИМІЗАЦІЯ МІНЕРАЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ
РОСЛИН В НЕСПРИЯТЛИВИХ УМОВАХ
ВИРОЩУВАННЯ У МІСЯЧНИЙ ОРАНЖЕРЕЇ**

*I. Є. Засіць, Т. М. Вознюк, М. В. Ковальчук,
I. С. Рогуцький, Д. В. Лукашов, О. В. Митрохін,
С. П. Машковська, Б. Г. Фойнг, Н. О. Козировська*

Передбачається, що перші рослини відіграватимуть важливу роль в утворенні протогрунту достатньої родючості, потрібної для цільового вирощування другого покоління рослин, таких як пшениця, рис, соя тощо. Залишки рослин першого покоління могли б бути компостовані і перетворені мікроорганізмами у подібний до ґрунту субстрат в регенеративній системі життезабезпечення. Місячний реголіт може бути

використано як субстрат для вирощування рослин на початку місії, щоб скоротити витрати. Використання мікробних спільнот для праймування рослин дозволить полегшити адаптацію до стресових умов і забезпечити розвиток рослини в несприятливих умовах. Добре охарактеризовані, асоційовані з рослинами бактерії використовувалися для вирощування трьох сортів чернобривців (*Tagetes patula* L.) в анортозиті, субстраті низької біодоступності, аналогічному місячній гірській породі. Консорціум складався з бактерії *Paenibacillus* sp. IMBG156 та ризобактерій, що сприяють росту рослин, який стимулював проростання насіння, поліпшував розвиток рослин і, в кінцевому результаті, цвітіння інокультивованих чернобривців. На противагу цьому, контрольні рослини погано росли в анортозиті і практично не доживали до цвітіння. Аналіз складу бактерійної спільноти показав, що всі види бактерій колонізували коріння рослин, проте рівень колонізації залежав від алелопатичних характеристик видів чернобривців. Бактерії консорціуму здатні вивільнити деякі елементи (Ca, Fe, Mn, Si, Ni, Cu, Zn) з анортозиту. Колонізація рослин змішаною культурою бактерійних штамів призводила до збільшення накопичення рослиною K, Mg, Mn і зниження рівня накопичення токсичних металів. Припускається, що раціонально підібраний консорціум бактерійних штамів сприяв проростанню насіння чернобривців і підтримував розвиток рослин в несприятливих для росту умовах за допомогою вилучування необхідних для рослин поживних елементів і захисту рослин проти наднакопичення деяких токсичних металів.

УДК 504.064.3:574+520.1+523.44+629.78

В. К. Тарадий¹, В. Г. Годунова¹, Н. В. Карпов¹,
А. В. Сергеев¹, М. Г. Сосонкин², С. И. Барабанов³

¹Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень НАН України, Київ

²Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

³Інститут астрономії РАН, Москва, Росія

Контроль потенциально опасных объектов и техногенного загрязнения атмосферы и ближнего космоса на обсерватории Терскол

Надійшла до редакції 30.03.06

Описується застосування комплексів приладів й устаткування високогірної обсерваторії Терскол для відстеження подій та процесів, що відбуваються в атмосфері й близькому космосі. Наводяться практичні результати наземних спостережень, які у поєднанні з даними засобів космічного базування надають можливість більш повного контролю екологічного стану навколишнього середовища.

ВВЕДЕНИЕ

В средине 1980-х годов в среде экологов возникла и начала активно пропагандироваться идея устойчивого развития: если человечество хочет оставить будущим поколениям шанс на выживание и развитие, то необходимо уже сейчас гармонизировать деятельность по освоению окружающего пространства — как наземного, так и околоземного. При этом существенная роль отводится контролю и прогнозированию состояния окружающей среды с целью предотвращения катастроф природного и техногенного характера. Необходим также более эффективный учет влияния космогеофизических факторов (космической погоды) на процессы, происходящие на Земле. К таким факторам относятся космическое излучение, столкновение с Землей астероидов и комет, солнечная активность, вызывающая вариации в геомагнитном поле и изменения в атмосфере планеты, и др.

Космические средства мониторинга позволяют

контролировать многие ключевые параметры состояния окружающего пространства. Однако для решения ряда задач больше подходят наземные средства наблюдения. В первую очередь это касается отслеживания космического мусора техногенного происхождения — верхних ступеней ракет, фрагментов космических аппаратов и отработавших свой ресурс спутников.

Наземные исследования по-прежнему остаются незаменимыми и для изучения процессов в атмосфере. Хотя измерения со спутников охватывают практически всю поверхность земного шара, но они имеют сравнительно невысокое пространственное и временное разрешение. В частности, спутниковые данные о параметрах нижних слоев атмосферы — химическом составе, температуре, направлении ветра и т. п. — обладают значительными погрешностями [14, 17].

Следовательно, для получения единой интегрированной системы мониторинга окружающего пространства необходимо объединение наземных

и космических наблюдательных средств. В настоящее время предпринимаются усилия в направлении повышения взаимодействия различных средств контроля и улучшения качества данных. В этой связи важное значение приобретает идея создания обсерватории для мониторинга окружающей среды, которая могла бы, используя наземные средства мониторинга (астрономические телескопы и приборы для изучения атмосферы), проводить исследования, представляющие наибольшую значимость в плане контроля окружающей среды, включающей и атмосферу, и околоземное космическое пространство.

ОБСЕРВАТОРИЯ ТЕРСКОЛ КАК МОНИТОРИНГОВАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

В деятельности обсерватории Терскол Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины (Северный Кавказ, 3120 м над уровнем моря) как обсерватории мониторинга окружающей среды следует выделить такие основные направления:

- обнаружение и отслеживание потенциально опасных объектов (сближающихся с Землей астероидов, комет);

- контроль засоренности околоземного пространства космическим мусором;
- мониторинг состояния атмосферы (изменение химического состава, стратосферно-тропосферный обмен, трансконтинентальные перемещения загрязненных воздушных масс).

Система мониторинга атмосферы и ближнего космоса на обсерватории Терскол представляет собой измерительно-информационную систему с инструментальными средствами (комплексом аппаратуры для астрономических и атмосферно-оптических наблюдений), развитой структурой баз данных, средствами/методами оперативного сбора, обработки, хранения и передачи информации (см. табл. 1).

Исследования химического состава атмосферы были начаты на пике Терскол еще в конце 1980-х годов и касались определения общего содержания озона, аэрозоля и других газовых составляющих по спектрофотометрическим наблюдениям Солнца. Результаты этих работ продемонстрировали высокую точность использованной методики и широкие возможности ее применения [8].

Здесь мы остановимся на исследованиях экологической направленности, проводимых на обсерватории Терскол в настоящее время.

Таблица 1. Аппаратно-программные средства и информационное обеспечение наблюдений на обсерватории Терскол

Интернет и система передачи и хранения информации:

Локальная сеть на все павильоны и инструменты обсерватории	100 МВ/с
Общее число постоянно работающих машин в сети	более 20
Общее число зарегистрированных пользователей	более 50
Выход в интернет через спутник	512/64 KB/c
Радиомост на нижнюю базу в поселке Терскол (в т.ч. www, FTP, mail)	11 МВ/с
Радиомост на Баксанскую нейтринную обсерваторию ИЯИ РАН	11 МВ/с
Локальный сервер (Elbrus)	1
Собственное доменное имя	terskol.com
Интернет, mail, FTP	www.terskol.com
Служба времени (GPS, стандартный радиоканал), погрешность не более	1 мкс

Информационная поддержка наблюдений

Каталоги USNO, GSC, TYHO, UCAC и др., пакеты программ для работы с ними
Пакеты программ для вычисления эфемерид (GUIDE-7 и др.) с интернет-сервисом
Быстрый доступ к международным сервисным службам и данным (MPC, DSS, ...)
Технические средства для архивации и работы с носителями информации (CD, DAT, ZIP)

ОТСЛЕЖИВАНИЕ СОБЫТИЙ НА ПЕРЕХОДНЫХ И ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТАХ И КОНТРОЛЬ ЗАСОРЕННОСТИ БЛИЖНЕГО КОСМОСА

Оптические средства наблюдений предоставляют наиболее эффективную возможность обнаружения и отслеживания космического мусора, техногенная составляющая которого, в отличие от естественной (астероидов, метеоров, космической пыли), непрерывно увеличивается в результате запусков новых объектов, выполнения разного рода технологических операций на орбите, а также вследствие аварий космических аппаратов (КА).

Крупный 2-м телескоп, снабженный современными панорамными светоприемниками и средствами цифровой обработки изображений, значительно расширяет возможности оптических наблюдений для сопровождения стартов КА и их движения на переходных и стационарных орbitах, позволяет получать обширную информацию о процессах и состоянии объектов на разных фазах полета, выполняет мониторинг околоземного пространства для обнаружения элементов космического мусора и повышения безопасности полета аппаратов. Он создает следующие преимущества для оптического мониторинга:

- значительное снижение влияния погодного фактора и возможность проведения оптических наблюдений сквозь облачность, в разрывах густых облаков, при любых фазах Луны, в сумерках и т. д.;
- возможность наблюдения очень слабых, а следовательно, и небольших объектов;
- возможность одновременного наблюдения нескольких объектов, движущихся относительно звезд в любом направлении и практически с любой скоростью;
- большой входной световой поток позволяет применить узкополосные светофильтры как для выделения интересующих объектов на фоне оптических помех, так и для наблюдения различных процессов на самом объекте (выбросы вещества, разделение модулей, раскрытие панелей и т. п.);
- большая входная апертура создает благоприятные условия для высокоточной и быстрой фотометрии КА с привязкой данных наблюдений к фотометрическим системам по-

средством наблюдений в качестве стандартов слабых звезд из обзорных каталогов.

Отслеживание событий на геостационарных орбитах и оперативная обработка данных позиционных наблюдений ИСЗ и объектов в их окрестностях проводятся в обсерватории Терскол с 1997 г. [12, 13]; для этих целей был разработан специализированный программный комплекс. Для привязки фотометрических характеристик изображения используются в основном опорные звезды из Guide Star Catalogue (GSC). С учетом ошибок каталога погрешность измерения блеска составляет около $0.1''$, и это значение полностью определяется фотометрическими ошибками каталога GSC.

Характеристики основных измерительных систем комплекса 2-м зеркального телескопа следующие:

средняя квадратичная погрешность регистрации моментов событий — менее 1 мкс;
 средняя квадратичная погрешность измерений прямого восхождения и склонения объектов при использовании (с 2004 г.) каталога Twin Astrographic Catalogue UCAC2 составляет $0.3''$;
 средняя квадратичная погрешность фотометрических измерений не превосходит $0.1''$;
 проницательная способность телескопа в полосе V при экспозиции 1 с достигает $18''$, а при экспозиции 1000 с — $23''$;

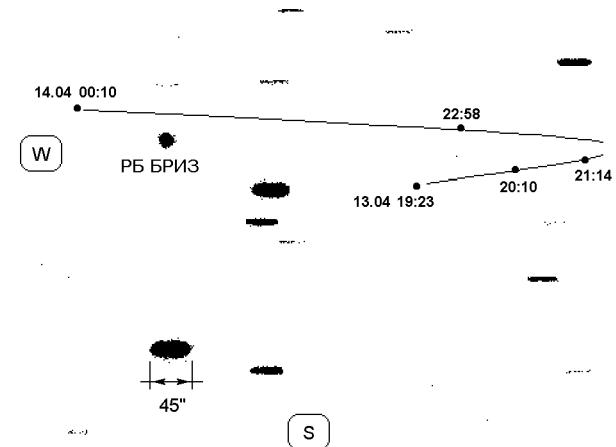


Рис. 1. Видимое взаимное расположение РБ БРИЗ и фрагментов 13/14 апреля 2001 г. по наблюдениям МЦАМЭИ на пике Терскол

для обнаружения доступны объекты на геостационарных орbitах размером менее 10 см и на взаимном расстоянии 1-2".

На рис. 1 показан пример отслеживания и определения орбиты неизвестного объекта, появившегося в момент отделения спутника от разгонного блока (РБ), который по результатам фотометрического анализа вариаций блеска был определен как фрагмент оснастки КА. Высокая проницательная способность телескопа позволяет также обнаруживать и отслеживать развитие во времени процессов выброса вещества (сброса топлива) из разгонного блока в окружающее пространство (рис. 2).

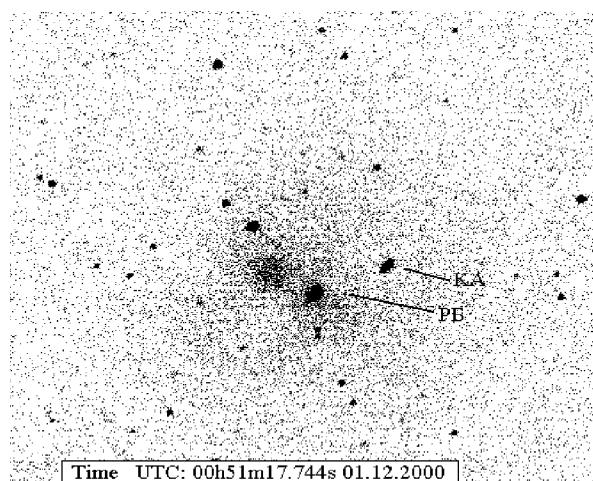


Рис. 2. Выброс вещества из разгонного блока

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОТСЛЕЖИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

В настоящее время ключевым элементом любых программ исследований по проблеме астероидно-кометной опасности является целенаправленный поиск и каталогизация объектов, сближающихся с Землей (NEOs), для чего разрабатываются специальные методики и наблюдательная аппаратура.

С 2002 г. обсерватория Терскол вместе с другими обсерваториями (в Симеизе, Мондах и Звенигороде) проводит синхронные/квазисинхронные кампании поисковых наблюдений круп-

ных тел в метеорных и болидных потоках [1, 7]. Для каждой обсерватории эфемериды рассчитываются таким образом, чтобы сканировать одну и ту же область пространства на расстояниях от 2 до 10 млн км в зависимости от лучевой скорости входящих в потоки тел. Основная идея используемой при этом методики поиска потенциально опасных тел метрового и декаметрового размера, разработанной сотрудниками Института астрономии РАН, состоит в том, что тела, приближающиеся к Земле, летят в направлении на наблюдателя, и следовательно, имеют малые угловые скорости. Это позволяет на расстоянии в несколько миллионов километров от Земли обнаружить объект размером до единиц метров [2, 5].

По результатам анализа данных наблюдений были обнаружены несколько десятков объектов в метеорных и болидных потоках Персеид, Каприкорнид, Комид, Леонид и других, рассчитаны их предварительные орбиты и определено, что это объекты размером от 1 до 30 м в диаметре и что они принадлежат именно исследуемым метеорным потокам [3, 4].

В рамках сотрудничества с Центром малых планет с целью уточнения элементов орбит на пике Терскол проводятся позиционные наблюдения астероидов, которые входят в список наиболее опасных объектов (NASA Near Earth Object Program). В табл. 2 представлена запись файла с результатами наблюдений астероида 99942 Apophis (2004 MN4). Наблюдения проводились в мае 2005 г., когда этот объект был доступен только крупным телескопам, оснащенным приемниками излучения с азотным охлаждением. Было получено 37 положений астероида в системе каталога USNO-A2.0. Кроме того, поскольку наблюдения выполнялись в двух фильтрах, дополнительно были получены оценки блеска этого объекта в R и V полосах для его фотометрии. Данные были переданы в международный банк данных, Центр малых планет (обсерватория Терскол включена в международный список обсерваторий наблюдения NEOs под номером B18).

Наряду с обнаружением и отслеживанием сближающихся с Землей малых небесных тел с целью прогноза места и времени возможного их столкновения с планетой ставится задача определения класса объекта в таксономической сис-

Таблица 2. Результаты позиционных и фотометрических наблюдений астероида 2004 MN4 на обсерватории Терскол 11/12 мая 2005 г.

CODE B18

ACK MPCReport file updated 2005.05.18 15:27:19

NET USNO-A2.0

2004MN4	C2005	05	10.76422	08	33	01.23	+18	26	59.7	19.4	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.77139	08	33	02.32	+18	26	58.2	20.0	V	B18
2004MN4	C2005	05	10.77602	08	33	03.02	+18	26	57.6	19.6	V	B18
2004MN4	C2005	05	10.78291	08	33	04.10	+18	26	56.2	19.5	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.78718	08	33	04.70	+18	26	55.5	19.6	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.79449	08	33	05.89	+18	26	54.0	19.4	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.79863	08	33	06.52	+18	26	53.2	19.3	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.80280	08	33	07.25	+18	26	52.6	19.9	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.80730	08	33	07.86	+18	26	51.7	19.6	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.81160	08	33	08.56	+18	26	51.2	19.8	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.81741	08	33	09.44	+18	26	49.9	19.6	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.82201	08	33	10.10	+18	26	49.1	19.5	R	B18
2004MN4	C2005	05	10.82818	08	33	11.11	+18	26	47.6	20.0	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.73293	08	35	32.61	+18	24	19.7	20.4	V	B18
2004MN4	C2005	05	11.73847	08	35	33.58	+18	24	17.5	20.1	V	B18
2004MN4	C2005	05	11.74251	08	35	34.33	+18	24	17.3	20.4	V	B18
2004MN4	C2005	05	11.75038	08	35	35.46	+18	24	14.8	19.9	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.75524	08	35	36.29	+18	24	14.4	20.3	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.75906	08	35	36.88	+18	24	13.6	20.1	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.76288	08	35	37.43	+18	24	13.0	19.7	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.76670	08	35	38.04	+18	24	12.0	20.2	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.77052	08	35	38.57	+18	24	11.7	19.5	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.77434	08	35	39.08	+18	24	11.5	20.7	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.77816	08	35	39.73	+18	24	10.0	20.2	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.78198	08	35	40.23	+18	24	08.9	20.1	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.78963	08	35	41.41	+18	24	07.9	20.0	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.79345	08	35	42.07	+18	24	07.2	20.0	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.79727	08	35	42.64	+18	24	06.7	19.8	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.80109	08	35	43.28	+18	24	05.3	19.9	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.80491	08	35	43.86	+18	24	04.9	19.5	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.80873	08	35	44.52	+18	24	04.7	20.1	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.81255	08	35	45.02	+18	24	03.5	19.9	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.81637	08	35	45.60	+18	24	02.9	19.4	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.82019	08	35	46.19	+18	24	02.0	20.0	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.82400	08	35	46.82	+18	24	00.8	20.4	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.82782	08	35	47.32	+18	24	00.5	19.7	R	B18
2004MN4	C2005	05	11.83164	08	35	48.00	+18	23	59.7	20.0	R	B18

теме классификации. Таксономический класс дает возможность судить о свойствах поверхности и внутреннем строении объекта и на основании этого определять его происхождение. Данная задача представляется важной в связи с тем,

что последствия столкновения Земли с телом астероидного происхождения будут существенно отличаться от таковых при столкновении с телом кометного происхождения, поскольку возможность горения, испарения вещества тела

или распада самого тела в атмосфере планеты различна в том и другом случае [9].

Определение таксономического типа небесного тела — это сложная наблюдательная задача, которая подразумевает разнородные измерения излучения от него. Основу таких измерений составляют поляриметрия, высокоточная фотометрия и спектральные измерения с низким разрешением (или узкополосная фотометрия) вплоть до ближней ИК-области спектра [6]. Приборная оснащенность 2-м телескопа обсерватории Терскол обеспечивает возможность регулярных наблюдений NEOs вплоть до 15—16^м с подвесным спектрографом в фокусе Кассегрена, который позволяет, не меняя съемной аппаратуры, проводить также фотометрические и поляриметрические измерения объекта в режиме разделенного времени [10]. Для определения фотометрических характеристик используется ПЗС-камера 512×512, охлаждаемая жидким азотом, и светофильтры системы *UBVR*. Длительность экспозиций — от 30 мин до 1 ч, масштаб изображения — около 1"/пкл. Точность позиционных наблюдений определяется точностью используемого каталога и составляет менее 0.3" [11].

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

Наблюдаемые в течение последних десятилетий изменения химического состава атмосферы, в том числе уменьшение озонового слоя, и связанные с этим глобальные и региональные колебания климата обуславливают необходимость контроля атмосферных параметров.

С одной стороны, необходим мониторинг возрастающих концентраций загрязняющих газов в нижнем слое атмосферы (приземного озона, оксидов азота, углерода и т. п.). С другой стороны, важно отслеживать, в частности, изменения количества озона на разных высотах, поскольку именно эти изменения вызывают нарушения в вертикальном распределении температуры в атмосфере, вариации в радиационных потоках и перемещение воздушных масс. Все эти обстоятельства в значительной степени влияют на климат Земли.

Мониторинг газового состава атмосферы стал на протяжении последних лет одним из основ-

ных направлений прикладных исследований на Терсколе. Это обусловлено тем, что пик Терскол является уникальным пунктом с точки зрения экологического контроля атмосферы и изучения климатических изменений. Здесь весомое значение приобретает тот факт, что существующие мониторинговые сети имеют очень мало станций в юго-восточной части Европы, а надежный контроль атмосферы в целом и ее составляющих может основываться лишь на однородных продолжительных наблюдениях с точек, равномерно распределенных по земной поверхности [15].

Благодаря удаленности обсерватории Терскол от промышленных и густонаселенных районов и значительной высоте над уровнем моря получаемые здесь наблюдения представляют собой важную информацию для изучения фонового состава атмосферы, для определения путей и направлений трансконтинентального переноса загрязненных воздушных масс, а также для изучения стрatosферно-тропосферного обмена [16]. К тому же наличие телескопов позволяет использовать астрономические методы для определения химического состава атмосферы. Накопленные в течение десятилетия спектры неба и небесных объектов предоставляют возможность получения информации о поведении парниковых и других газов на продолжительных отрезках времени.

Уникальные возможности обсерватории Терскол используются в ряде уже реализуемых и планируемых международных экологических программ. В частности, МЦАМЭИ входит в число участников сети передового опыта ACCENT-проекта 6-й рамочной программы ЕС, направленного на выработку общеевропейской стратегии по исследованию атмосферных изменений (<http://www.accent-network.org>).

В настоящее время станция Терскол, осуществляющая фоновый мониторинг на территории Российской Федерации, выполняет измерения концентрации приземного озона. К задачам, которые призвана решать региональная станция экологического мониторинга, относятся:

- создание системы непрерывного контроля состояния нижнего слоя тропосферы, т. е. оперативные измерения и накопление информации о концентрации загрязняющих газов и метеорологических параметрах;
- обработка данных и их анализ с использова-

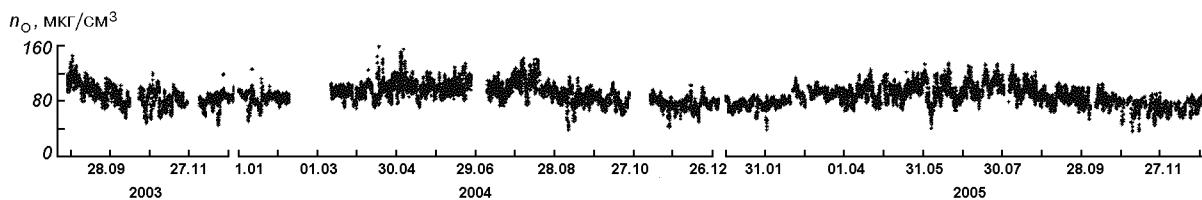


Рис. 3. Данные наблюдений концентраций приземного озона в районе пика Терскол в 2003—2005 гг.

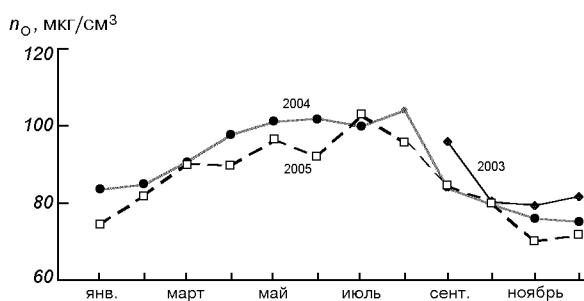


Рис. 4. Среднемесячные значения концентраций приземного озона в районе пика Терскол: ромбики — 2003 г., точки — 2004 г., квадратики — 2005 г.

нием данных других станций для исследования путей трансконтинентального и вертикального перемещения воздушных масс;

- анализ долгосрочных изменений химического состава тропосфера и сравнение этих изменений с глобальными;
- получение информации об общем содержании озона и других газов в атмосфере (в частности, с использованием астрономических методов).

Работы по организации на пике Терскол станции экологического мониторинга были начаты в 2003 г. — тогда здесь был установлен озонометр DASIBI 1008 UV Photometric Ozone Analyzer, который непрерывно производит автоматические измерения концентрации озона в окружающем воздухе. Данные представляют собой ежеминутные замеры, а также усредненные 10-мин и часовые значения концентраций озона. На рис. 3 представлены ряды данных, полученные с августа 2003 г. по декабрь 2005 г. Анализ данных показывает явно выраженный сезонный ход: наибольшие среднемесячные концентрации приземного озона в районе пика Терскол (на высоте 3120 м над уровнем моря) наблюдаются

в апреле—августе и составляют около 100 мкг/см³ (50 ppbv); зимние месяцы характеризуются значительным снижением среднемесячных значений — до 70 мкг/см³ (рис. 4). Летом отдельные среднечасовые значения могут достигать 180 мкг/см³, а минимумы наблюдаются зимой — менее 40 мкг/см³. Суточные вариации, проанализированные по всему набору данных, демонстрируют зависимость изменений концентраций озона от таких факторов — помимо обычных фотохимических процессов — как метеорологические явления, вертикальный и горизонтальный перенос загрязненных воздушных масс, интрузия стратосферного озона и др.

Станция экологического мониторинга Терскол имеет серьезные перспективы для развертывания и совершенствования, прежде всего за счет инсталляции новых приборов и эффективного внедрения методов определения по астрономическим спектрам долговременных изменений химического состава атмосферы, в частности общего содержания озона, стратосферного диоксида азота и других парниковых газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение состояния окружающего пространства и прогнозирование кратковременных и долговременных его изменений является одним из важнейших условий достижения устойчивого развития. Исследования, проводимые на обсерватории Терскол с использованием современных аппаратно-программных средств (инструментов, методик, каналов связи и т. д.) обеспечивают возможность эффективного контроля атмосферы и околоземного космического пространства, что, собственно, и является задачей первостепенной важности в работе мониторинговой обсерватории.

1. Багров А. В., Баканас Е. С., Барабанов С. И. и др. О миграции малых тел Солнечной системы и обнаружении потенциально опасных небесных тел, включая фрагменты «космического мусора» // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—2003.—№ 4.—С. 261—264.
2. Багров А. В., Болгова Г. Т., Микиша А. М. и др. Программа наблюдений крупных тел в метеорных и болидных потоках // Тез. докл. конф. «Программы наблюдений высокоорбитальных спутников Земли и небесных тел Солнечной системы». — СПб: ИТА РАН, 1994.—С. 17—18.
3. Баканас Е. С., Барабанов С. И., Болгова Г. Т. Астрономический аспект проблемы космической защиты Земли // Околоземная астрономия-2003 / Под ред. Л. В. Рыхловой и др. — СПб.: ВВМ, 2003.—Т. 1.—С. 16—37.
4. Барабанов С. И. Наблюдения крупных тел в метеорных потоках за пределами атмосферы Земли // Околоземная астрономия (космический мусор) / Под ред. А. Г. Масевич. — М.: Космосинформ, 1998.—С. 214—230.
5. Барабанов С. И., Болгова Г. Т., Микиша А. М. и др. Обнаружение крупных тел в метеорных потоках за пределами земной атмосферы // Письма в Астрон. журн.—1996.—22.—С. 945—949.
6. Барабанов С. И., Гумеров Р. И., Сергеев А. В. и др. Предварительные результаты фотометрических и спектрометрических наблюдений избранных астероидов, сближающихся с Землей // Тез. докл. междунар. конф. «Околоземная астрономия-2005» (Казань, 19—24 сентября 2005 г.). — Казань: ИНАСАН и КГУ, 2005.—С. 67.
7. Барабанов С. И., Дерюгин В. А., Зайцев А. В. и др. О подготовке демонстрационного эксперимента «Астероид—Прогноз» // Околоземная астрономия-2003 / Под ред. Л. В. Рыхловой и др. — СПб.: ВВМ, 2003.—Т. 1.—С. 217—226.
8. Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Терез Г. А. и др. Определение общего содержания озона по спектрофотометрическим наблюдениям Солнца в УФ-области спектра // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 3.—С. 266—273.
9. Микиша А. М., Смирнов М. А., Смирнов С. А. Мало-размерные тела в околоземном космическом пространстве: опасность столкновения с Землей и возможность предотвращения катастрофы // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор) / Под ред. А. Г. Масевич. — М.: Космосинформ, 1995.—С. 91—103.
10. Мусаев Ф. А., Сергеев А. В. Многомодовый спектрометр для фокуса Кассегрена телескопа Цейсс-600 // Тез. науч. конф. «Околоземная астрономия-2003» (8—13 сентября 2003 г., Терскол, КБР, Россия). — М.: ИНАСАН и МЦАМЭИ, 2003.—С. 45.
11. Сергеев А. В., Карпов Н. В., Тарадий В. К. и др. Фотометрия астероидов и ИСЗ // Тез. докл. междунар. конф. «Околоземная астрономия-2005» (Казань, 19—24 сентября 2005 г.). — Казань: ИНАСАН и КГУ, 2005.—С. 50.
12. Тарадий В. К. Навигация искусственных небесных тел по данным оптических наблюдений в обсерватории на пике Терскол // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—2006.—№ 2.—С. 82—97.
13. Тарадий В. К., Сергеев А. В., Карпов Н. В. Прецизионный измерительный комплекс определения положения объектов в ближнем космосе // Измерительная техника.—2006.—№ 3.—С. 38—42.
14. Blumenstock T., Griesfeller A., Hase F., et al. Comparison of MIPAS O₃ profiles with ground-based measurements // Proc. of ENVISAT Validation Workshop (Frascati, Italy, 9—13 Dec 2002). — ESA/SP-531, August 2003.
15. Lindskog A., Beckmann M., Monks P., et al. Tropospheric ozone research // Towards cleaner air for Europe — Science, Tools and Applications. P. 2. Overview from the Final Reports of the EUROTRAC-2 Subprojects / Eds P. M. Midgley, M. Reuter. — Weikersheim, Margraf Verlag, 2003.—P. 251—270.
16. Penkett S. A., Law K. S., Platt U., et al. European export of particulates and ozone by long-range transport // Towards cleaner air for Europe — Science, Tools and Applications. P. 2. Overview from the Final Reports of the EUROTRAC-2 Subprojects / Eds P. M. Midgley, M. Reuter. — Weikersheim, Margraf Verlag, 2003.—P. 99—108.
17. Velden Ch., Daniels J., Stettner D., et al. Recent innovations in deriving tropospheric winds from meteorological satellites // Bull. Amer. Meteor. Soc.—2005.—86.—P. 205—223.

MONITORING OF NEOS AND TECHNOGENIC POLLUTION OF THE ATMOSPHERE AND OUTER SPACE AT THE TERSKOL OBSERVATORY

*V. K. Tarady, V. G. Godunova, N. V. Karпов,
A. V. Sergeev, M. G. Sosonkin, S. I. Barabanov*

The use of instrumental facilities at the high-altitude Terskol Observatory for the monitoring of events and processes in the atmosphere and outer space is described. The practical results derived from ground-based observations are presented. It is shown that the integrating operational information collected from space and Earth observation platforms would allow better understanding and control of the state of our planet and its environment.

УДК 521.2+522.5

А. Е. Вольвач¹, В. В. Румянцев¹, И. Е. Молотов^{2,3}, А. С. Сочилина²,
В. В. Титенко², В. М. Агапов³, Р. И. Киладзе⁴, Т. Шильдкнехт⁵,
В. В. Бирюков^{1, 6}, М. А. Ибрагимов⁷, А. Л. Маршалкина⁷, В. В. Власюк⁸,
О. В. Юрьшева⁹, И. Д. Стрепка¹, А. А. Коноваленко¹⁰, Дж. Туккари¹¹

¹Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», с. Наукове

²Головна (Пулковська) астрономічна обсерваторія Російської академії наук, Санкт-Петербург, Росія

³Інститут прикладної математики ім. М. В. Келдиша Російської академії наук, Москва, Росія

⁴Національна астрофізична обсерваторія Грузії, Тбілісі, Грузія

⁵Астрономічний інститут Бернського університету, Берн, Швейцарія

⁶Державний астрономічний інститут ім. П. К. Штернберга Московського державного університету, Москва, Росія

⁷Астрономічний інститут ім. Улугбека, АН РУЗ, Ташкент, Узбекистан

⁸Спеціальна астрофізична обсерваторія Російської академії наук, с. Нижній Архиз, Росія

⁹Інститут сонячно-земної фізики Сибірського відділення Російської академії наук, Іркутськ, Росія

¹⁰Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

¹¹Інститут радіоастрономії Італії, Ното, Італія

Исследования фрагментов космического мусора в геостационарной области

Надійшла до редакції 28.03.06

Подані результати досліджень об'єктів космічного сміття малих розмірів в геостаціонарній області. Роботи проводяться в НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» (НДІ КрАО) в рамках проекту організації наукової мережі для дослідження об'єктів природного і техногенного походження в навколоземному космічному просторі. Спостереження виконувалися широкою кооперацією рядом європейських оптических і радіоінструментів, включно ЗТШ, АТ-64 і РТ-22 у НДІ КрАО. Знайдено 49 фрагментів з близьким $16\text{--}19.5^m$, визначено їхні орбітальні параметри, оцінено фізичні характеристики, підтверджено існування груп фрагментів, приблизно зв'язаних загальним походженням (т.зв. «хмар»), і підтвердили існування нового класу об'єктів з унікально великим значенням відношення площини до маси. Проведена РНДБ-локація виявленіх фрагментів з метою одержання високоточних траекторних даних і оцінки розміру та параметрів руху об'єктів відносно центра мас за характером зміни і характеристик відбитого сигналу.

ВВЕДЕНИЕ

С 2003 г. НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (НИИ КрАО) принимает активное участие в программе исследований космического мусора, совместно инициированной Инс-

титутом прикладной математики им. М. В. Келдиша и Главной астрономической обсерваторией Российской академии наук (ИПМ РАН, ГАО РАН) в рамках проекта организации научной сети для исследования объектов естественного и техногенного происхождения в околоземном

космическом пространстве. Понятие «космический мусор» (КМ) охватывает широкий класс космических объектов искусственного происхождения (рис. 1).

Количество выработавших ресурс спутников, различных ступеней ракет и их фрагментов в околоземном космическом пространстве достигло того уровня, когда они начинают создавать



Рис. 1. Распределение каталогизированных орбитальных космических объектов по группам

серьезную угрозу не только для космических аппаратов (КА), но и для экологии Земли и околоземного космического пространства в целом.

В настоящее время наземными средствами контроля космического пространства США официально каталогизировано (т. е. регулярно сопровождается и идентифицировано с источником происхождения) более 9500 объектов, находящихся на околоземных орбитах. Общее же количество обнаруженных и сопровождаемых объектов с эквивалентным диаметром более 10 см превысило 13300. Дальнейшее освоение околоземного пространства невозможно без знания текущей обстановки, анализа источников и закономерностей эволюции КМ. В тоже время результаты исследований космического мусора могут быть использованы для совершенствования теорий орбитального движения, уточнения модели геопотенциала Земли, развития теории влияния светового давления (как прямого солнечного света, так и отраженного от Земли) на движение орбитальных космических объектов, исследования магнитного поля Земли и вариаций плотности верхней атмосферы Земли.

Таблица 1. Элементы орбит 12 спутников, которые вероятно разрушились

NN	T_0 , (MJD)	e	i , град	Ω , град	ω , град	λ , град	$d\lambda/dt$, °/сут	$\Delta(d\lambda/dt)$, °/сут
66053J	47071.688587 03.10.1987	0.010312 0.016240	11.5253 11.5321	9.4976 9.5757	281.7312 281.2806	288.3453 288.9544	22.53757 23.21439	0.67682
67066G	49397.408163 14.02.1994	0.005317 0.008096	11.6745 11.6578	25.3957 25.4061	25.8977 5.6721	6.2241 6.6536	32.02443 31.08647	-0.93796
68081E	48673.397616 21.02.1992	0.008545 0.008862	11.9100 11.9100	21.7275 21.7541	76.5843 71.3055	196.7101 196.8043	4.27995 4.48664	0.20669
73040B	44671.200700 08.03.1981	0.004358 0.002713	5.8669 5.8728	62.8461 62.8123	19.1543 328.2317	145.2013 144.8817	-2.32077 -2.53725	-0.21648
73100D	48718.887352 06.04.1992	0.027538 0.026787	13.3263 13.3121	45.5479 45.4283	165.4079 163.3701	215.9878 216.0936	-18.79458 -18.98845	-0.19387
75118C	46867.643023 13.03.1987	0.002005 0.001049	8.5729 8.5710	57.4781 57.0155	25.9386 154.5391	301.1890 300.6946	0.80057 0.97525	0.17468
76023F	43060.207900 09.10.1976	0.013845 0.014202	25.3482 25.2918	10.9980 10.6278	215.4257 215.9062	226.6138 226.5970	-7.22838 -7.25248	-0.02410
77092A	43680.632778 21.06.1978	0.003366 0.000195	0.1407 0.1356	77.3145 74.7306	256.1496 -50.7829	98.8366 98.5127	0.04767 -0.08512	-0.13279
78113D	50744.547145 23.10.1997	0.028236 0.027325	14.1715 14.1604	38.2444 38.1593	177.1164 166.2476	163.1494 163.8886	-22.90318 -23.45809	-0.55491
79087A	45121.755000 01.06.1982	0.000987 0.000451	1.6575 1.6578	90.9652 92.3283	196.5378 83.5444	52.5730 52.5333	0.07580 -0.01223	-0.08803
2019B	45960.349103 17.09.1984	0.000518 0.001376	0.3705 0.3440	143.1092 138.3305	301.5961 35.1682	201.9020 201.7803	3.06907 3.54342	0.47435
84129B	50074.650093 23.12.1995	0.000938 0.005996	5.9226 5.8441	57.9216 55.5646	294.3247 203.3469	359.9551 359.6639	-4.06615 -4.86859	-0.80244

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ОБЛАСТИ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

До сих пор в области геостационарной орбиты (ГСО) каталогизировались в основном объекты крупнее 1 м в поперечнике. При этом достоверно известно о существовании значительного количества не каталогизированных объектов размером от 0.2 до 1.5 м (фрагменты, сопровождающие запуски КА, обломки крупных объектов и т. п.). Следует отметить, что практически все объекты космического мусора на ГСО остаются там навсегда, накапливаясь со временем численно и увеличивая вероятность столкновения с КА. Поэтому проблема исследований малоразмерной фракции космического мусора на ГСО является чрезвычайно актуальной. Регулярные международные кампании по наблюдению области ГСО, в том числе с использованием метровых телескопов, выявили наличие сотен не каталогизированных фрагментов размером от 10 до 50 см [4]. Разработанная в ГАО РАН теория долгопериодического движения ГСО-объектов ЛАПЛАС [3] позволяет анализировать наблюдения неуправляемых объектов на длительных интервалах времени и обнаруживать случайные изменения орбит, обусловленные разрушениями или столкновениями с частицами космического мусора. Исследование движения 456 управляемых спутников на интервале 1993—2003 гг. с использованием накопленного в ИПМ РАН и ГАО РАН архива орбитальных данных позволило обнаружить 1155 изменений скоростей дрейфа ГС, не объясняемых естественной эволюцией. При этом был отмечен прогрессивный характер этих изменений, т. е. в каждом последующем временном отрезке их количество уве-

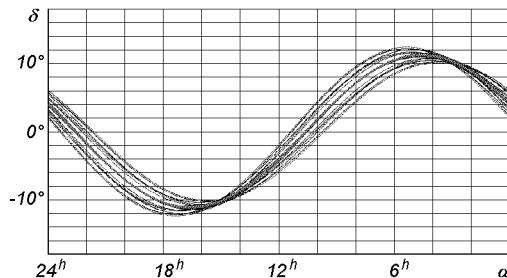


Рис. 2. Траектория объекта 1967-066G Транстейдж и модельных фрагментов его разрушения в геоцентрических координатах

личивалось. На основе анализа изменений скорости дрейфа был составлен перечень из 12 объектов, предположительно испытавших разрушение взрывного характера (табл. 1). Для обнаружения фрагментов этих взрывов был предложен т. н. «барьерный» метод. В соответствии с этим подходом должны наблюдаться локальные области пересечения траекторий фрагментов с областью ГСО.

Каждая такая область рассчитывается на основе прогноза баллистической эволюции модельных фрагментов разрушившегося родительского объекта (при этом для моделирования используется сферически-симметричная модель взрыва). Было доказано [5], что все образовавшиеся фрагменты в течение суток пересекают две локальные области («барьеры») шириной менее 0.1° на ГСО, отстоящие друг от друга на 180° по аргументу широты, и которые фактически являются местами сгущения траекторий фрагментов.

На рис. 2 в геоцентрических координатах изображена траектория объекта 1967-066G Транстейдж и траектории смоделированных фрагментов его разрушения. Момент разрушения известен из эволюции орбиты объекта. Расчетная скорость разлета смоделированных фрагментов в начальный момент времени была взята равной 75 м/с. Как видно, имеются два барьера (на небесной сфере это диаметрально противоположные точки), где траектории фрагментов сгущаются. В области таких барьеров и выбира-

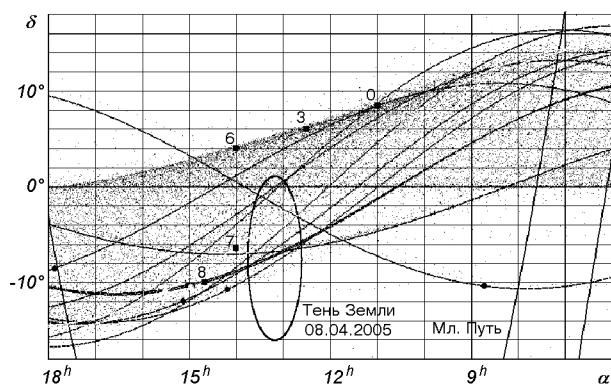


Рис. 3. Положения барьеров, выбранных для наблюдений в КрАО в апреле 2005 г. Квадраты — области барьера, линии — трассы Экранов и Транстейджей. Обозначены границы области Млечного Пути (10° от галактического экватора) и контур тени Земли на дату новолуния 08/04/2005. Точки — расчетные положения каталогизированных объектов в области ГСО в течение ночи

лись поисковые площадки. Поисковые площадки могут также выбираться в областях пространства с повышенной плотностью известных геостационарных объектов, которые образуются из-за специфического распределения плоскостей орбит КМ, обусловленного гравитационными возмущениями [2]. На рис. 3 показаны положения барьеров, использованных для поиска фрагментов в НИИ КрАО со 2 по 15 апреля 2005 г. Барьеры 0, 3 и 6 расположены в области повышенной плотности ГСО-объектов, барьер 7 — на траектории объекта 1979-087A Экран-4, а барьер 8 — на траекториях объектов 1977-092A Экран-2, 1968-081E Транстейдж и 1967-066G Транстейдж. Изображено положение тени Земли и Млечного пути, поскольку барьеры должны выбираться в областях с малыми фазовыми углами (вблизи тени Земли), но по возможности дальше от галактического экватора (вне областей с повышенной плотностью звезд).

Для поиска фрагментов, при поддержке грантов министерства образования и науки РФ и ИНТАС 03-70-567 была организована кооперация Центров сбора, анализа и обработки информации в ИПМ РАН и ГАО РАН и обсерваторий с оптическими телескопами, способными наблюдать космические объекты слабее 16^m . Методика обнаружения фрагментов в выбранных поисковых площадках отрабатывалась на телескопах АТ-64 (для объектов с блеском до 17.5^m) и ЗТШ (для объектов с блеском до 19.5^m) в НИИ КрАО. Методика сопровождения обнаруженных фрагментов также отрабатывалась на 60-см телескопах Крымской станции ГАИШ в п. Научном, в обсерватории на горе Майданак и в Саянской обсерватории «Монды» ИСЗФ СО РАН, а также 1-м телескопе в САО РАН (п. Нижний Архыз). Кроме того, в наблюдениях приняли участие обсерватория Астрономического института Бернского университета в Циммервальде (Швейцария) и обсерватория Европейского космического агентства на пике Тейде, о. Тенерифе (Канарские острова, Испания) с 1-м телескопами, которые проводили поиск объектов, а также сопровождали фрагменты, обнаруженные по наблюдениям НИИ КрАО. В свою очередь, в НИИ КрАО сопровождались фрагменты, обнаруженные в Циммервальде и Тенерифе.

Для получения более полного представления об открытых объектах в области ГСО целесооб-

разно использовать не только оптические, но и радиолокационные наблюдения. Радиолокация позволяет получить высокоточные траекторные измерения, необходимые для уточнения орбитальных параметров объектов, параметры движения объектов относительно центра масс (в частности, период вращения), оценки формы и размеров. В рамках данной работы координатные и некоординатные радиолокационные измерения получены с использованием метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), который является наиболее точным в астрометрии.

Были проведены совместные оптико-радиолокационные наблюдения:

- 1) измерения по каталогизированным объектам с известными координатами;
- 2) статистические измерения количества мелких фрагментов, пролетающих через объем пространства, образованный пересечением лучей диаграммы направленности передающей и приемной антенны;
- 3) поиск новых не каталогизированных объектов в выбранных областях ГСО.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

К настоящему моменту с помощью оптических инструментов обнаружено 49 объектов с блеском $15—19.4^m$, (рис. 4), отсутствующих в доступных каталогах. Из них 34 объекта обнаружены в КрАО, 15 — в обсерваториях Тейде и Циммервальде. По этим объектам получено около 6000 измерений. 14 фрагментов (в том числе один размером порядка 20 см) наблюдались на интервалах от 60 до 388 сут, что подтверждает прин-

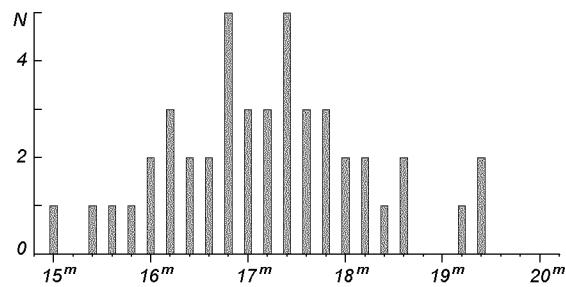


Рис. 4. Распределение количества N обнаруженных фрагментов по среднему блеску

ципиальную возможность каталогизации таких объектов при организации регулярных наблюдений. На рис. 5 показан типовой кадр с изображением слабого объекта в области ГСО.

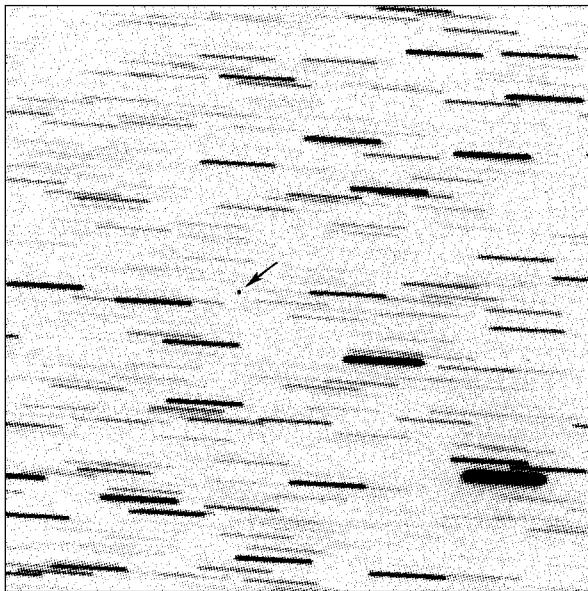


Рис. 5. Кадр с изображением объекта 90008

24 фрагмента наблюдались на интервале больше 5 сут (см. табл. 2), что дало возможность проследить эволюцию их орбит и оценить влияние светового давления на изменения параметров орбиты.

На основе полученных значений коэффициентов светового давления проведена оценка отношения площади поперечного сечения к массе (рис. 6). В большинстве случаев отношение площади к массе для фрагментов оказывается в десятки и сотни раз больше, чем для КА. Это обстоятельство представляет дополнительную трудность для наблюдения фрагментов, поскольку влияние светового давления носит не столь регулярный характер, как гравитационные возмущения, и не может быть полностью учтено из-за незнания формы, отражательных характеристик и других свойств фрагментов. Поэтому при прогнозировании их движения накапливаются ошибки, превышающие в несколько раз поле зрения используемых инструментов, и при больших перерывах в наблюдениях объекты теряются, так как осуществлять их поиск чрезвычайно затруднительно. На рис. 7 приведен график эволюции эксцентриситета орбиты на 11-летнем интервале объекта 90015, имеющего на-

Таблица 2. Интервалы сопровождения для 24 фрагментов

Объект	Дата начала наблюдений	Дата последних наблюдений	Интервал наблюдений, сут	Обсерватория, открывшая объект
90003	2004-10-18	2005-01-10	84	КрАО
90004	2004-10-14	2005-02-10	119	КрАО
90005	2004-11-07	2005-11-12	339	КрАО
90006	2004-12-17	2005-12-26	373	КрАО
90007	2004-12-18	2005-01-13	26	КрАО
90008	2005-01-09	2006-02-01	388	КрАО
90009	2005-03-15	2006-01-24	315	КрАО
90010	2005-07-08	2005-09-06	60	КрАО
90014	2005-09-05	2006-01-25	141	КрАО
90015	2005-10-06	2005-10-11	5	КрАО
90016	2005-10-07	2005-12-30	84	КрАО
90017	2005-10-09	2005-10-24	15	КрАО
90019	2005-10-07	2006-01-30	122	КрАО
43007	2005-03-08	2006-01-09	306	Тейде
43012	2005-08-01	2005-09-15	35	Тейде
43014	2005-08-04	2005-09-02	29	Тейде
43015	2005-08-04	2005-08-12	8	Тейде
43016	2005-08-05	2005-08-17	12	Тейде
43019	2005-08-06	2005-12-05	121	Тейде
43020	2005-08-07	2005-08-30	23	Тейде
43021	2005-08-06	2005-10-12	67	Тейде
43022	2005-08-08	2006-01-11	157	Тейде
43023	2005-08-10	2005-08-31	22	Тейде
43101	2005-12-29	2006-02-22	56	Циммервальд

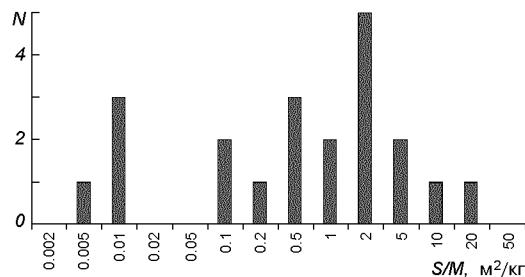


Рис. 6. Распределение количества N обнаруженных фрагментов по значениям отношения площади к массе (всего 21 фрагмент)

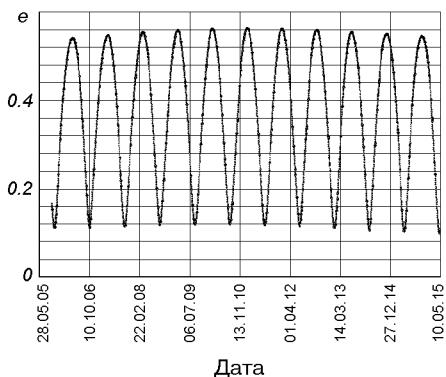


Рис. 7. Эволюция эксцентриситета e орбиты объекта 90015

ибольшее значение отношения площади к массе. Величина эксцентриситета всего за полгода изменяется более чем в четыре раза. До сих пор на ГСО не было известно ни одного подобного объекта. Орбита объекта 90015 регулярно пересекает не только орбиты других объектов в области ГСО, но также орбиты КА навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, «Galileo».

В то же время у некоторых объектов (90006, 90008, 90009) обнаружены малые значения отношения площади к массе, что указывает на различную физическую природу разных фрагментов. Для ряда фрагментов определен предполагаемый источник их образования, на основе близости орбиты фрагмента и орбиты объекта-источника. Подтверждено существование «облаков» фрагментов, возникших при разрушении спутников серии Экран и ступеней типа Транстейдж.

В качестве примера на рис. 8 представлен график изменения блеска фрагмента 90006, полученного на ЗТШ 8 октября 2005 г. Блеск

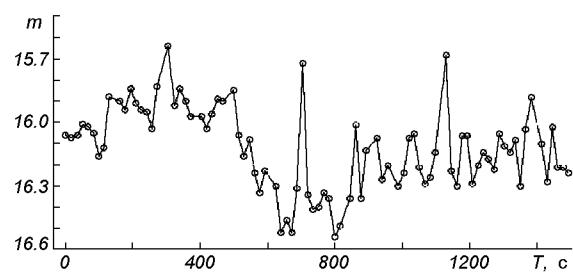


Рис. 8. Кривая блеска ГСО-фрагмента 90006, 08.10.2005

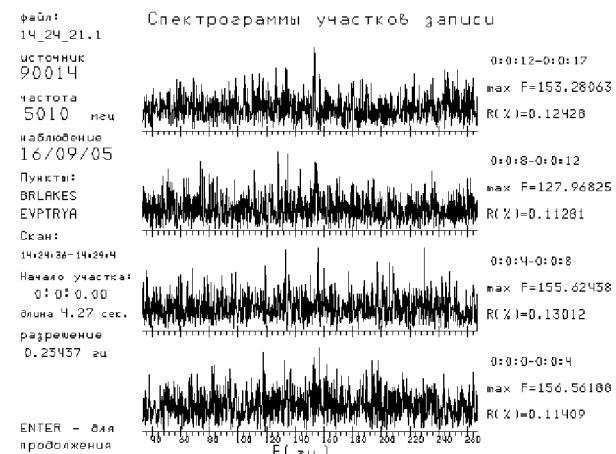


Рис. 9. Кросс-корреляция записей зондирующего радиосигнала и принятого эхо-сигнала для малоразмерного геостационарного фрагмента 90014 на базовой линии «Евпатория — Медвежьи Озера», 16.09.2005, 14:24:36 UT, частота Доплера равна 15777 Гц. Обработка корреляторе НИРФИ-3

объекта претерпевает сложные колебания в интервале звездных величин $15.7\dots16.5^m$. Характерное время высокочастотных колебаний — около 1 мин, низкочастотных — 14 мин.

В сентябре 2005 г. впервые удалось провести радиолокацию трех фрагментов, обнаруженных в НИИ КрАО, в рамках международной кампании по отработке метода РСДБ-локации [1]. Наблюдения проходили с участием передающей антенны РТ-70 в Евпатории и приемного радиотелескопа РТ-22 в Симеизе НИИ КрАО и других антенн с регистрацией излучаемого и эхо-сигналов на РСДБ-терминалах. На рис. 9 представлена спектрограмма корреляционной обработки, полученная на корреляторе НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде для объекта 90014.

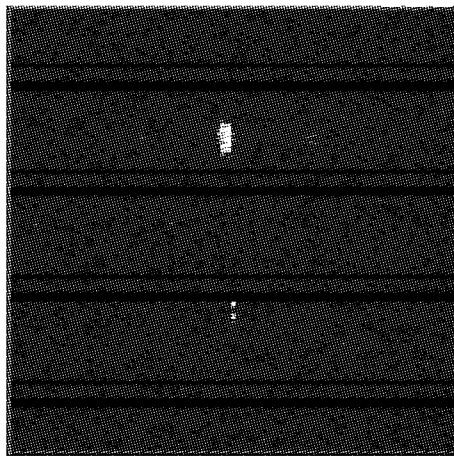


Рис. 10. Обнаружение двух объектов в области ГСО в эксперименте «бим-трек». Обработка коррелятора в Ното

Для отработки метода радиолокационного обнаружения ГСО-объектов в экспериментах методом РСДБ-локации предложена техника наблюдения в так называемом режиме «бим-трек». При этом выбранная область пересечения лучей передающей и приемных антенн неподвижна относительно звезд и таким образом смещается вдоль геостационарной орбиты. Для регистрации эхо-сигналов в этом режиме был специально разработан РСДБ терминал квазиреального времени (NRTV), позволяющий осуществлять высокоскоростную запись сигналов на жесткие диски ПК в полосе частот 48 МГц и их последующую трансляцию в центр обработки по каналам интернета [6]. На рис. 10 показан пример детектирования двух объектов при обработке последовательности кадров записи формата NRTV в Ното (Италия).

В дальнейшем предполагается организовать центры экспресс-анализа «бим-трек» экспериментов непосредственно на радиотелескопах, а терминалы NRTV будут использоваться также и для проведения локационных РСДБ-измерений по обнаруженным фрагментам в квазиреальном времени. С этой целью предложена концепция «распределенного коррелятора» [7], предусматривающая выполнение первой фазы обработки (комплексное быстрое преобразование Фурье с частотным разрешением 0.015 Гц) на радиотелескопах, и передачу на коррелятор по каналам связи только выделенного полезного эхо-сигна-

ла. Также разработан проект дооснащения антенн РСДБ-сети [6], в рамках которой происходит развитие метода РСДБ-локации, цифровыми видеоконверторами гDBBC с многоуровневым квантованием, что позволяет применить для анализа принятых эхо-сигналов классические радиолокационные методы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках научной программы исследований космического мусора, реализуемой совместно обсерваториями стран СНГ и Европы с участием НИИ КрАО, впервые начали проводиться систематические работы по поиску и сопровождению объектов слабее 16^m в области геостационарной орбиты. Привлечение второго по величине телескопа в СНГ с диаметром главного зеркала 2.6-м обеспечило настоящий прорыв как в изучении популяции фрагментов, так и в сотрудничестве с европейскими учеными. Разработанные стратегии поиска фрагментов на ГСО позволяют уверенно обнаруживать новые объекты с блеском 15—19.4^m и сопровождать их на длительных интервалах времени (14 из 49 найденных фрагментов наблюдались более двух месяцев). Получение независимого подтверждения существования нового класса объектов с таким большим отношением площади поперечного сечения к массе, что влияние светового давления приводит к существенной эволюции эксцентриситета и наклонения их орбит, требует пересмотра существующих моделей динамического распределения космического мусора в околоземном пространстве и оценок опасности для функционирующих КА.

С участием радиотелескопа РТ-22 в Симеизе отработана технология получения высокоточных траекторных данных по высокоорбитальным объектам методом РСДБ-локации, а также технологии обнаружения неизвестных объектов в области ГСО в режиме «бим-трек».

Данные исследования были проведены в результате скоординированных усилий большого количества участников. Авторы благодарны персоналу телескопов, корреляторов и центров анализа за помощь в проведении наблюдений. Особую благодарность хотелось бы выразить НИИ КрАО за предоставленную возможность использу-

зования наблюдательного времени на уникальных инструментах и радиотелескопе.

Работа частично поддержана грантами INTAS IA 03-59-11 и 03-70-567.

1. Молотов И. Е., Вольвач А. Е., Коноваленко А. А. и др. Международные эксперименты по исследованию околоземных объектов с помощью метода РСДБ-локации // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 2/3.—С. 87—92.
2. Agapov V., Biryukov V., Kiladze R., et al. GEO objects search and orbital analysis // Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18—20 April 2005 / Ed. by D. Danesy. — Darmstadt, 2005.—P. 153—158.
3. Kiladze R. I., Sochilina A. S. On the new theory of Geostationary satellite motion // Astron. and Astrophys. Transactions.—2003.—22, N 4-5.—P. 525—528.
4. Schildknecht T., Musci R., Flury W., et al. Optical observations of space debris in high-altitude orbits // Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris, 18—20 April 2005 / Ed. by D. Danesy. — Darmstadt, 2005.—P. 113—118.
5. Sochilina A., Kiladze R., Grigoriev K., et al. On the orbital evolution of explosion fragments // Adv. Space Res.—2004.—34, N 5.—P. 1198—1202.
6. Tuccari G., Molotov I., Buttacio S., et al. E-LFVN — An Internet Based VLBI Network // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, NICT Technology Development Center News National Institute of Information and Communications Technology. — Tokyo, Japan,

2004.—N 25.—P. 59—63.

7. Tuccari G., Molotov I., Volvach A. E-NRTV — Radar VLBI Network // Abstracts of the Fourth IVS General Meeting, January 9-13, 2006. — Concepcion, Chile.—2006.—P. 35.

RESEARCHES OF SPACE DEBRIS FRAGMENTS OVER THE GEOSTATIONARY AREA

*A. E. Volvach, V. V. Rumjantsev, I. E. Molotov,
A. S. Sochilina, V. V. Titenko, V. M. Agapov,
P. I. Kiladze, T. Schildknecht, V. V. Biryukov,
M. A. Ibragimov, A. L. Marshalkina, V. V. Vlasuk,
O. V. Yurisheva, I. D. Strepka, A. A. Konovalenko, G. Tuccari*

The researches carried out at the CrAO with the use of the ZTSh, AT-64 and RT-22 optical and radio telescopes in large international cooperation during 2004—2005 are described. The space debris is a new scientific field for the Crimean astrophysical observatory, nevertheless, the results obtained are significant. These works were arranged under project of organization of scientific sensors network for the investigation of near-Earth objects. In all, 49 GEO-fragments fainter than 16 star magnitude were detected and tracked to determine their orbital parameters and to estimate their physical characteristics. The existence of fragment clouds and a new class of the unique objects with extra-high area-to-mass ratio was confirmed. The VLBI radar experiment was arranged for few discovered fragments to obtain precise trajectory measurements and some data on fragment sizes and rotation periods.

УДК 550.385.37:550.388.2

М. В. Ляшенко¹, В. А. Пуляев¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН і МОН України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности

Надійшла до редакції 16.01.06

Одержано кількісні характеристики добових та сезонних варіацій основних параметрів іоносферної плазми для чотирьох геофізичних періодів (зимового та літнього сонцестояння, весняного та осіннього рівнодення) у період росту сонячної активності (1997—1998 рр.) у діапазоні висот 210—1050 км. Проведено комп’ютерне моделювання варіацій низки параметрів динамічних процесів в іоносфері. Виявлені та підтвержені регіональні особливості розподілу основних параметрів геокосмічної плазми.

ВВЕДЕНИЕ

Физическое истолкование и моделирование процессов в ионосферной плазме является одной из актуальных задач исследования геокосмоса.

В настоящее время описанию поведения основных параметров ионосферы посвящено большое количество исследований [1, 4, 5, 7, 8, 14, 18—23, 25, 26, 28, 29]. В большинстве случаев в них представлены экспериментальные данные, полученные различными радиофизическими методами в западном полушарии. Сравнение экспериментальных данных с глобальными моделями ионосферы показало, что известные модели ионосферы лишь качественно описывают пространственно-временное распределение параметров ионосферной плазмы в конкретном регионе. Это связано в первую очередь с отсутствием сферической симметрии ионосферы Земли, а также с тем, что указанные модели ионосферы построены на основе данных сети радаров некогерентного рассеяния (НР) в западном полушарии. Таким образом, разработка новых и количественное уточнение известных моделей ионос-

феры является важной и актуальной задачей [3, 5, 9, 10, 31].

Целью работы является исследование количественных характеристик суточных и сезонных вариаций параметров ионосферы в период роста солнечной активности (1997—1998 гг.) для дат, близких к солнцестояниям и равноденствиям. Проведено также компьютерное моделирование параметров динамических процессов в ионосферной плазме. Полученные результаты используются нами для построения модели ионосферы над центральной Европой.

Методы исследования и анализа экспериментальных данных аналогичны тем, которые применялись нами в работах [9, 10] при исследовании вариаций параметров ионосферной плазмы в периоды максимума и спада солнечной активности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для анализа и компьютерного моделирования суточных и сезонных вариаций основных па-

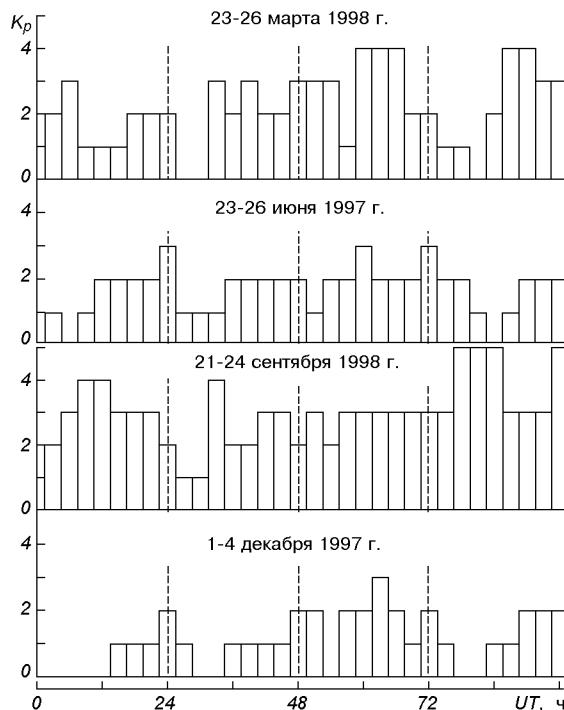
Рис. 1. K_p -индексы для выбранных периодов

Таблица 1. Индексы солнечной и геомагнитной активности для выбранных четырех периодов

Дата	$F_{10.7}$	W	A_p
02.12.1997	96	109	4
03.12.1997	108	109	4
04.12.1997	116	104	6
24.03.1998	120	120	6
25.03.1998	114	114	7
26.03.1998	110	110	16
24.06.1997	72	72	6
25.06.1997	74	74	4
22.09.1998	142	142	12
23.09.1998	144	144	7

метров геокосмической плазмы и динамических процессов в плазме использованы данные радара НР Института ионосферы НАН и МОН Украины [9, 10, 15]. Измерения на радаре НР проведены для четырех периодов, близких к равноденствиям и солнцестояниям: 24—26 марта 1998 г., 24—25 июня 1997 г., 22—23 сентября 1998 г., 2—4 декабря 1997 г. Сведения о гелиогеофизической обстановке для этих периодов представлены на рис. 1 и в табл. 1.

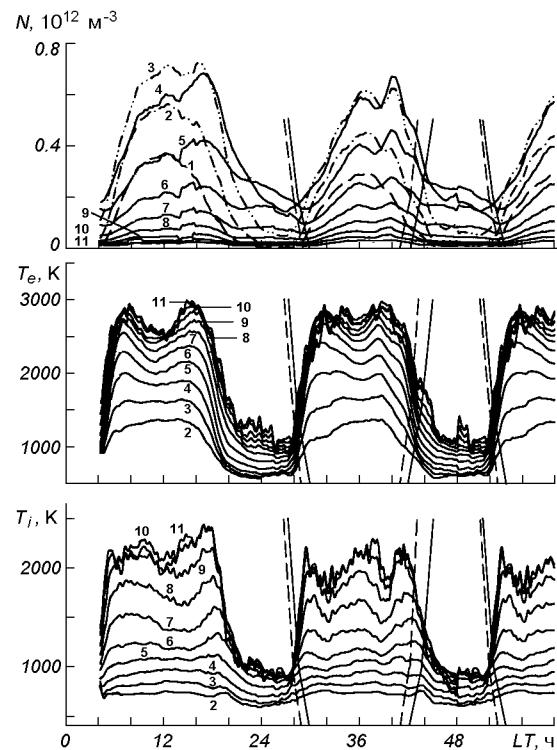


Рис. 2. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к весеннему равноденствию 24—26 марта 1998 г. для разных высот: 1 — 210, 2 — 240, 3 — 290, 4 — 340, 5 — 410, 6 — 490, 7 — 580, 8 — 680, 9 — 790, 10 — 910, 11 — 1050 км. Здесь и далее сплошные и штриховые наклонные линии показывают восход и заход в Харькове и магнитосопряженной точке на разных высотах

На рис. 2—5 представлены суточные и сезонные вариации концентрации электронов, температуры ионов и электронов для четырех характерных геофизических периодов: весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

Суточные вариации концентрации электронов. В период, близкий к весеннему равноденствию (рис. 2) концентрация электронов N испытывает значительные изменения в течение суток. На высотах $h = 210$ и 240 км в суточном ходе N имеет место один максимум в околосолнцестояннические часы с абсолютными значениями $N \approx 0.35 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ и $0.55 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ соответственно. С увеличением высоты максимум суточных вариаций N смещается на более поздние часы с появлением максимума около 16 ч (здесь и

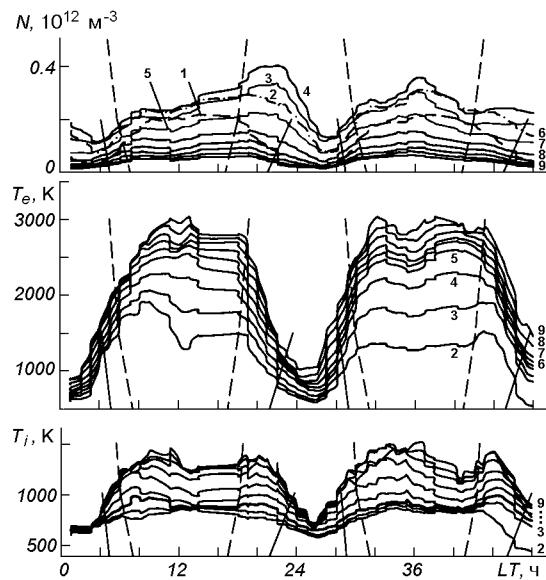


Рис. 3. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к летнему солнцестоянию 24–25 июня 1997 г. для разных высот: 1 — 250, 2 — 310, 3 — 360, 4 — 420, 5 — 470, 6 — 530, 7 — 580, 8 — 640, 9 — 690 км

далее — местное время). В околополуденные часы на высоте 290 км концентрация электронов достигает значений $0.7 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью — $0.05 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте 580 км днем $N \approx 0.12 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы $0.065 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Начиная с высоты $h \geq 410$ км, наблюдается локальное увеличение концентрации электронов в ночные часы (23–04 ч).

Летом (рис. 3) на высотах $h \leq 250$ км в суточных вариациях N имеет место один максимум около 12–13 ч с абсолютным значением $0.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Ночью на высоте 250 км значение концентрации электронов уменьшается до значений $N \approx 0.025 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. С увеличением высоты наблюдается тенденция к появлению двух максимумов — утреннего и вечернего. До высот $h \approx 530$ км величина вечернего максимума превосходит величину утреннего. Днем на высоте 580 км $N \approx 0.11 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью — $0.025 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Для периода осеннего равноденствия (рис. 4), как и весной, концентрация электронов испытывает значительные суточные вариации. На высоте $h = 210$ км в суточном ходе наблюдается один околополуденный максимум со значениями

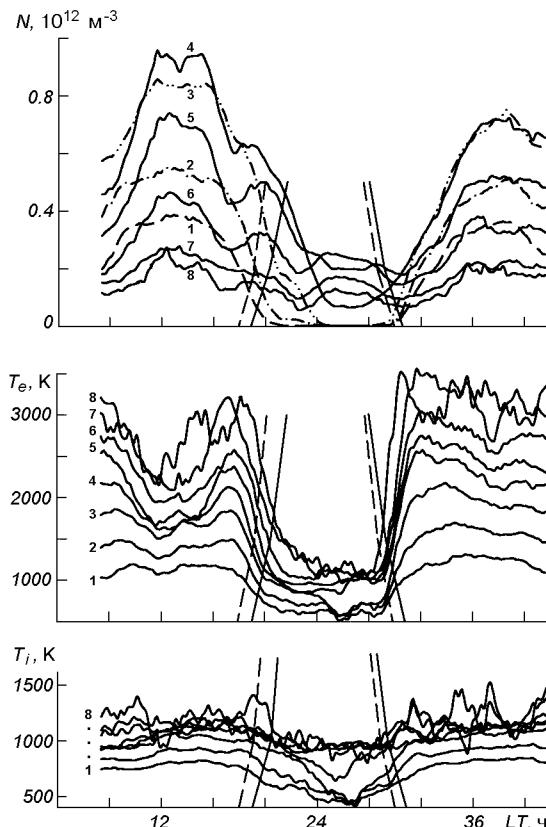


Рис. 4. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к осеннему равноденствию 22–23 сентября 1998 г. для разных высот: 1 — 190, 2 — 210, 3 — 240, 4 — 290, 5 — 340, 6 — 410, 7 — 490, 8 — 550 км

$N \approx 0.55 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Ночью концентрация электронов уменьшается до значений $0.01 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В дневные часы на высоте 550 км $N \approx 0.3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью — $0.1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Начиная с высоты $h \geq 290$ км, в суточных вариациях появляется второй максимум около 18–19 ч. С увеличением высоты он смещается на более поздние часы. На высотах $h \geq 410$ км, как и для периода весеннего равноденствия, в ночные время в суточных зависимостях имеет место локальный экстремум (00–02 ч).

Для периода зимнего солнцестояния (рис. 5) во всем высотном диапазоне в суточных зависимостях концентрации электронов наблюдается один максимум в околополуденные часы и локальное увеличение ночью (22–04 ч). На высоте $h = 250$ км днем $N \approx 0.6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные

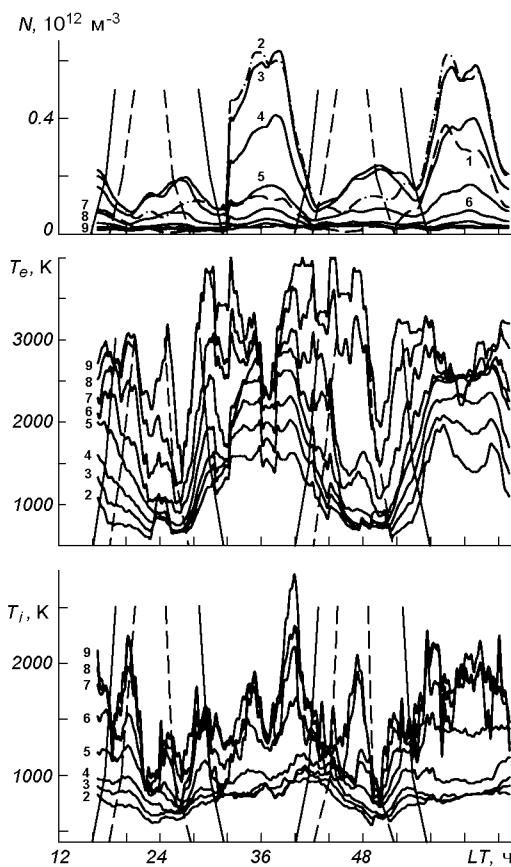


Рис. 5. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к зимнему солнцестоянию 2–4 декабря 1997 г. для разных высот: 1 — 200, 2 — 250, 3 — 310, 4 — 360, 5 — 470, 6 — 580, 7 — 690, 8 — 800, 9 — 910 км

часы — $0.1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте $h = 580$ км в дневные часы $N \approx 0.075 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью — $0.01 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Суточные вариации температуры ионов и электронов. Температуры электронов и ионов испытывают значительные вариации в течение суток. С увеличением высоты T_e и T_i увеличиваются. В суточном ходе T_e имеет место локальный околополуденный минимум во всем рассматриваемом высотном диапазоне.

Для периодов весеннего и осеннего равноденствий (рис. 2 и 4) в суточном ходе наблюдаются два максимума — утренний (около 07 ч) и вечерний (около 16–17 ч). Весной и осенью в дневные часы на высоте 240 км $T_e \approx 1400$ и

1750 К соответственно. Ночью $T_e \approx 600$ К как весной, так и осенью. На высоте $h = 490$ км в весенний период днем $T_e \approx 2500$ К, осенью — около 3000 К. Ночные значения T_e весной близки к 750 К, осенью — 1000 К.

Для периода летнего солнцестояния (рис. 3) суточные зависимости T_e подобны весенним и осенним. В суточном ходе видны два максимума — утром и вечером, а также локальный минимум около 12 ч. Дневные значения T_e на высоте 310 км примерно равны 1500 К, в ночные часы — 600 К. На высоте 530 км днем $T_e \approx 2500$ К, ночью — 750 К.

Зимой, как и для других сезонов, в суточных вариациях T_e имеют место утренний и вечерний максимумы, локальный околополуденный минимум (рис. 5). На высоте 250 км дневные значения T_e достигают примерно 1500 К, ночью на этой же высоте — 600 К. На высоте 470 км $T_e \approx 2750$ К в дневные часы и 850 К ночью.

Температура ионов T_i для всех периодов имеет протяженный максимум в течение дневного времени. В суточном ходе T_i иногда наблюдается появление утреннего и вечернего максимумов.

Для весеннего равноденствия (рис. 2) на высоте 240 км $T_i \approx 750$ К днем и 550 К в ночные часы. На высоте 490 км дневные значения $T_i \approx 1250$ К, ночью $T_i \approx 810$ К.

Летом (рис. 3) T_i на высоте 310 км достигает значений 850 К днем и примерно 500 К ночью. На высоте 530 км дневные значения $T_i \approx 1250$ К, ночью — около 850 К.

Для периода осеннего равноденствия (рис. 4) на высоте 240 км дневные значения $T_i \approx 1000$ К, ночью — 500 К. На высоте 490 км значение T_i составляет около 1200 К в дневные часы и 950 К ночью.

Для периода зимнего солнцестояния (рис. 5) значения T_i в дневные часы на высоте 250 км составляют примерно 970 К, ночью — около 600 К. На высоте 470 км днем $T_i \approx 1250$ К, в ночные часы $T_i \approx 800$ К.

Сезонные вариации параметров ионосферной плазмы. Известно, что сезонные вариации концентрации электронов заключаются в превышении дневных зимних значений N над летними на высотах вблизи максимума области F2 ионосферы. Такое сезонное поведение концент-

рации электронов получило название сезонной аномалии. Из анализа экспериментальных данных выявлены следующие сезонные особенности N . На высоте 250 км околополуденные зимние значения N превышают летние примерно в 3 раза, на высоте 310 км — в 2 раза, на высоте 360 км — в 1.5 раза. Для ночи сезонная аномалия не наблюдается — в околополуночные часы зимние значения N практически совпадают с летними. Следует отметить, что с увеличением высоты сезонная аномалия исчезает, и на высотах $h \geq 410$ км летние дневные значения N превышают зимние.

Для равноденственных периодов сезонные вариации концентрации электронов заключаются в следующем. На высотах 210—240 км в местный полдень весенние значения N превышают осенние примерно в 1.5 раза. В ночные часы на высотах 200—240 км осенние и весенние значения N практически не различаются. Весной и осенью на высотах $h \geq 340$ км значения концентрации электронов различаются не более чем на 10—20 %.

Различие между зимними и летними значениями как T_e , так и T_i составляет не более 10—15 %. Для осеннего и весеннего равноденствий различие в этих температурах не превышает 15—20 %.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Одной из задач теоретического моделирования является расчет вторичных параметров процессов по экспериментально измеренным первичным параметрам.

Как известно, на высотах области F2 ионосферы процессы переноса плазмы и энергии становятся более существенными, чем фотохимические процессы образования и исчезновения заряженных частиц. Динамические процессы играют важную роль в формировании высотного профиля концентрации электронов в целом, и области F2 в частности.

В настоящей работе проведен расчет энергии, подводимой к электронному газу, и значений плотности потоков частиц за счет амбиполярной диффузии. Используя известные теоретические соотношения и основные параметры ионосфер-

ной плазмы, полученные на радаре НР, можно рассчитать частоты соударений электронов с нейтралами и ионами, тензоры амбиполярной диффузии и теплопроводности, а также значения плотности потоков тепла и частиц в ионосферу. Для расчетов привлекалась также термосяферная модель MSIS [23].

Поток частиц за счет диффузии. За счет уменьшения плотности атмосферы скорость ионизации выше 150—180 км уменьшается с высотой пропорционально уменьшению концентрации нейтральных частиц. В то же время скорость диффузии увеличивается с уменьшением плотности газа.

Плазма как единое целое диффундирует через нейтральную атмосферу. Выражение для вертикальной составляющей скорости переноса заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии имеет вид [1, 7]

$$V_{dz} = - D_a \sin^2 I \left(\frac{1}{H_p} + \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial z} + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $D_a = \frac{kT_p}{m_i \nu_{in}}$ — продольная составляющая тензора амбиполярной диффузии,

$$\nu_{in} = \nu_{O^+, O} + \nu_{O^+, O_2} + \nu_{O^+, N_2} + \nu_{O^+, H} + \nu_{O^+, He}$$

— суммарная частота соударений ионов с нейтралами, $\nu_{O^+, O}$, ν_{O^+, O_2} , ν_{O^+, N_2} , $\nu_{O^+, H}$, $\nu_{O^+, He}$ — частоты соударений ионов кислорода в собственном газе, с атомами и молекулами кислорода, азота, водорода и гелия соответственно, $T_p = T_e + T_i$ — плазменная температура, $H_p = \frac{kT_p}{m_i g}$ — плазменная приведенная высота, m_i — масса иона, I — наклонение геомагнитного поля, N — концентрация электронов.

Полный диффузионный поток плазмы в вертикальном направлении вычисляется по формуле

$$\Pi_d = V_{dz} N. \quad (2)$$

Энергия, подводимая к электронному газу. В области F ионосферы частота столкновений электронов с нейтралами становится меньше, чем с ионами, поэтому основными механизмами охлаждения электронного газа являются потеря тепла при столкновениях электронов с ионами, возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [29].

Имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с этим переносом нелокальный нагрев электронного газа.

На высотах $h \leq 350$ км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь, и уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае имеет вид [29]

$$\begin{aligned} Q &= L_{ei} + L_e, \\ L_{ei} &= 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_n^{-3/2}, \\ L_e &= 6.4 \cdot 10^{-37} N(O)(T_e - T_i) T_n^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Q — энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях с фотоэлектронами, L_{ei} — энергия, теряемая при электрон-ионных столкновениях, L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода, N — концентрация электронов в ионосфере, $N(O)$ — концентрация атомов кислорода. Температура нейтралов T_n и концентрация $N(O)$ рассчитывалась с привлечением модели MSIS.

Поток тепла, переносимого электронами. Тепловой баланс электронного газа зависит от величины потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Термоэнергия в плазмосфере накапливается за счет сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования во внешнюю ионосферу. Часть электронов теряют свою энергию в кулоновских соударениях с тепловыми электронами и ионами. Другая часть электронов попадает в магнитную силовую трубку. В силовой магнитной трубке происходят многократные отражения электронов от ее концов, за счет этого захваченные электроны разогреваются. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно в ионосферу в результате высокой теплопроводности электронного газа [1].

Тепловой поток можно определить из кинетического уравнения с учетом переноса сверхтепловых электронов. Далее рассматривается вертикальная составляющая плотности потока тепла, поступающего из плазмосферы [9, 10],

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z}, \quad (4)$$

где $\kappa_e = 2.08 \cdot k^2 N T_e / m v_{ei}$ — продольная составля-

ющая тензора теплопроводности электронного газа, k — постоянная Больцмана, m — масса электрона.

Частоту соударений электронов с ионами O^+ для расчета коэффициента теплопроводности в (4) можно найти, используя выражение вида [2]

$$v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} N T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поток плазмы за счет диффузии. Потоки заряженных частиц за счет амбиополярной диффузии играют существенную роль в формировании профиля электронной концентрации области F2 ионосферы. На рис. 6 представлены расчетные значения суточных вариаций потока частиц за счет диффузии. Как видно из представленных зависимостей, для всех периодов форма суточных вариаций Π_d подобна.

Для рассмотренного высотного диапазона вочные часы для всех сезонов диффузионный

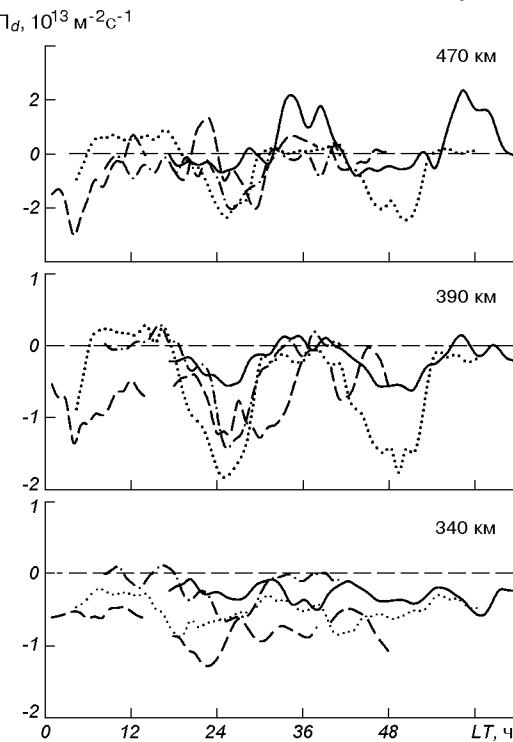


Рис. 6. Суточные вариации плотности потока плазмы за счет амбиополярной диффузии: пунктир — 24–26.03.1998 г., штрихи — 24–25.06.1997 г., штрих-пунктир — 22–23.09.1998 г., сплошная — 2–4.12.1997 г.

поток максимален по величине и направлен вниз в ионосферу. В дневные часы имеет место незначительный поток вниз, а с увеличением высоты направление потока изменяется, и перенос заряженных частиц за счет амбиополярной диффузии осуществляется вдоль магнитных силовых линий вверх в плазмосферу.

Весной на высотах $h = 340$ и 470 км в околополуночные часы величина плотности потока $\Pi_d \approx -6.5 \cdot 10^{12}$ и $-2.1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ соответственно, осенью $-0.9 \cdot 10^{12}$ и $-11 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ соответственно. Летом на высоте $h = 340$ км $\Pi_d \approx -1.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$, на высоте $h = 470$ км наблюдается поток плазмы вверх с величиной $\Pi_d \approx 2.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Для периода зимнего солнцестояния на высоте $h = 340$ км поток достигает значений $-2.7 \cdot 10^{12}$ и $-6.9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ на высоте $h = 470$ км.

В околополуденные часы для периода летнего солнцестояния на высоте $h = 340$ км $\Pi_d \approx 5.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$, и на высоте $h = 470$ км имеет место диффузионный поток вверх в плазмосферу $\Pi_d \approx 6.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Для зимнего периода наблюдается подобная ситуация. На высотах примерно 340 км поток частиц за счет диффузии направлен вниз и имеет значения $\Pi_d \approx -3.7 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$. С увеличением высоты изменяется направление потока заряженных частиц и его абсолютные значения $\Pi_d \approx 10.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ на высоте $h = 470$ км.

Для периода весеннего равноденствия значения диффузионного потока на высоте $h = 340$ и 470 км равны $-3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ и $5.6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ соответственно. Осенью в дневные часы на высоте 340 км $\Pi_d \approx -1.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$, на высоте $h = 470$ км $\Pi_d \approx 0.3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Следует отметить, что в дневное время на больших высотах как в периоды солнцестояний, так и периоды равноденствий наблюдается существенный перенос заряженных частиц из ионосферы в плазмосферу. В этом случае плазмосфера является резервуаром заряженных частиц, который, в свою очередь, играет важную роль в поддержании ионосферы вочные часы.

Подвод энергии к электронному газу. На рис. 7 представлены суточные вариации значения энергии, подводимой к электрону в единицу времени для рассмотренных периодов. Следует отметить, что форма вариаций Q/N подобна для

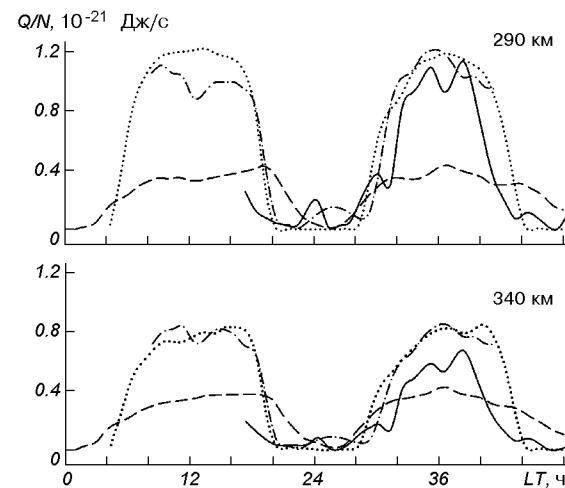


Рис. 7. Суточные вариации значения энергии Q/N , подводимой к электрону в единицу времени: пунктир — 24—25.03.1998 г., штрихи — 24—25.06.1997 г., штрих-пунктир — 22—23.09.1998 г., сплошная — 2—3.12.1997 г.

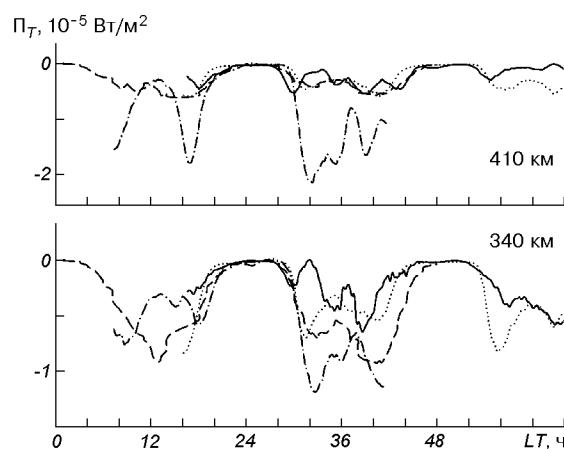


Рис. 8. Суточные вариации плотности потока тепла, передносимого электронами из плазмосферы в ионосферу: пунктир — 24—25.03.1998 г., штрихи — 24—25.06.1997 г., штрих-пунктир — 22—23.09.1998 г., сплошная — 2—3.12.1997 г.

различных сезонов. В суточных зависимостях Q/N в дневные часы имеет место явно выраженный максимум с локальным уменьшением значений Q/N в местный полдень. Вочные часы значения Q/N стремятся к нулю. Однако в послеполуночные часы в суточных вариациях возможны локальные максимумы. Летом в околополуденные часы на высоте $h = 290$ и 340 км

значения энергии равны $0.4 \cdot 10^{-21}$ Дж/с. Зимой $Q/N \approx 1.0 \cdot 10^{-21}$ Дж/с на высоте 290 км и $Q/N \approx 0.5 \cdot 10^{-21}$ Дж/с на высоте 340 км. Для периодов осеннего и весеннего равноденствий на высоте 290 км $Q/N \approx 1.2 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, а для $h = 340$ км — $0.8 \cdot 10^{-21}$ Дж/с.

Поток тепла из плазмосферы в ионосферу. На рис. 8 представлены суточные зависимости плотности потока тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Видно, что для периодов солнцестояний, а также весеннего равноденствия значения плотности потока тепла близки на фиксированных высотах. На высоте $h = 340$ км $\Pi_T \approx -0.5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м², для $h = 410$ км $\Pi_T \approx -0.25 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Для периода осеннего равноденствия $\Pi_T \approx -0.96 \cdot 10^{-5}$ и $-1.5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² на высотах 340 и 410 км соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ионосфера Земли представляет собой открытую динамическую нелинейную систему [16, 17]. Параметры ионосферы испытывают суточные и сезонные вариации, их поведение также зависит от уровня солнечной и магнитной активностей. Описание и интерпретация этих вариаций является довольно сложной задачей в геофизике.

Суточные вариации концентрации электронов. В периоды равноденствий происходит переход от летнего к зимнему типу суточных вариаций концентрации электронов и наоборот. Этот переход происходит относительно быстро, в течение примерно двух недель [7, 24]. Данный процесс связан с сезонными вариациями параметров термосферной циркуляции и вариациями нейтрального состава на высотах максимума области F2 ионосферы. Ранее мы уже использовали классификацию для определения типа суточных вариаций концентрации электронов на высоте максимума области F2 ионосферы (N_m F2) в равноденственные периоды [9, 10]. В настоящей работе получено, что суточный ход N_m F2 для периода 24—26 марта 1998 г. (рис. 2) можно отнести к SW-типу по классификации [24]. SW-тип, как и WS-тип, характерен тем, что ему присущи как летние особенности суточных вариаций N_m F2, так и зимние. В нашем случае в суточных вариациях N_m F2 имеет место протя-

женный максимум в дневные часы (летний период) с последующим уменьшением концентрации электронов без локального максимума около 20 ч (зимний период).

Днем на высотах $h \leq 240$ км поведение концентрации электронов определяется величиной зенитного угла Солнца. На высотах максимума ионизации и выше локальное увеличение N в ночные часы связано с эффектами термосферных ветров со скоростями 150—200 м/с и потоков частиц в ионосферу с величинами $\Pi_d \approx (1...3) \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [9, 10]. Роль этих процессов в поддержании ночной области F2 ионосферы примерно одинакова.

Суточные вариации N_m F2 для периода осеннего равноденствия 22—23 сентября 1998 г. можно отнести к WW-типу, который является хорошо выраженным зимним типом суточных вариаций. В этом случае для него характерны: вариации N_m F2 в течение суток, хорошо развитый максимум около 12—13 ч и последующим резким уменьшением N в вечерние часы [24]. Появление локальных максимумов на высотах $h \geq 490$ км в околополуночные часы связано с потоками плазмы и нейтральными ветрами.

Летом на высотах $h \leq 310$ км вариации N определяются величиной зенитного угла Солнца. Суточные вариации N имеют платообразный вид с максимумами в околополуденные и вечерние часы. Такой вид суточных зависимостей определяется зенитным углом Солнца.

Для периода зимнего солнцестояния для высот ниже максимума ионизации, как и для других сезонов, поведение концентрации электронов зависит от зенитного угла Солнца. На больших высотах имеет место появление послеполуночных максимумов. Вероятность появления локальных максимумов в суточных зависимостях N в средних широтах довольно высока для зимнего сезона и минимума солнечной активности [22]. Такое увеличение электронной концентрации в ночные часы связано с потоками частиц из плазмосферы и действием нейтральных ветров [1, 13]. Следует также отметить существенную роль эффектов магнитосопряженной точки, которая для Харькова расположена южнее острова Мадагаскар (36.5° ю. ш., 50.2° в. д.). Значительное увеличение N около 04 ч связано с восходом Солнца в летнем южном полушарии.

Суточные вариации температуры электронов и ионов. На высотах $h \leq 180$ км велика плотность частиц нейтрального газа, и по этой причине электроны и ионы интенсивно охлаждаются за счет соударений с частицами нейтральной атмосферы. При $h > 180$ — 200 км температура электронов начинает превышать нейтральную температуру и температуру ионов за счет уменьшения частоты соударений электронов с нейтралами. На высотах максимума области F2 и выше соотношение для температур имеет вид $T_e > T_i > T_n$.

Для периодов летнего и зимнего солнцестояний вариации T_e и T_i подобны. Появление в суточных вариациях утреннего и вечернего максимумов связано с вариациями потоков тепла (рис. 8) и величиной энергии Q/N , подводимой к электронному газу в единицу времени (рис. 7). С увеличением высоты имеет место смещение утреннего и вечернего максимумов в суточном ходе температуры электронов на более ранние и поздние часы соответственно. Этот процесс хорошо согласуется с ранее полученными результатами для других уровней солнечной активности [9, 10]. Данное смещение объясняется высокой теплопроводностью электронного газа. В этом случае наряду с процессами термализации фотоэлектронов существенную роль играют потоки тепла из плазмосферы (рис. 8).

Для равноденствий и солнцестояний суточные зависимости T_e и T_i подобны между собой. Как и для периодов солнцестояний, для равноденствий в суточных вариациях T_e имеют место утренний и вечерний максимумы.

Для всех сезонов в суточных вариациях T_e появление локального минимума можно объяснить тем, что охлаждение электронного газа усиливается при увеличении концентрации электронов в околополуденные часы и увеличении интенсивности передачи тепла от электронов к ионам. Как известно, в этом случае $T_e \propto N^{-1}$ [2].

Сезонные вариации параметров ионосферной плазмы. Для рассмотренных периодов выявлена сезонная аномалия — превышение зимних дневных значений концентрации N над летними на высотах, близких к высоте максимума области F2 ионосферы. В период роста солнечной активности зимние значения N превышают летние примерно в 2—3 раза. На больших

высотах и вочные часы сезонная аномалия не проявляется.

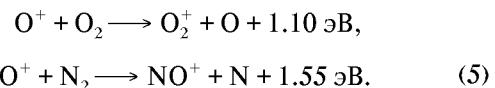
Для объяснения появления сезонной аномалии предложен ряд механизмов [1, 7, 12, 27, 28, 30]. Доминирующую роль играют сезонные вариации нейтрального состава на высотах максимума ионизации [7, 9, 10].

Вариации параметров нейтральной атмосферы, в свою очередь, обусловлены сезонными изменениями параметров термосферной циркуляции. Под действием градиентов давления легкие составляющие нейтральной атмосферы переносятся из более разогретых областей в холодные [1], в результате чего происходит увеличение в холодном зимнем полушарии концентрации О и Не, а летнее полушарие насыщается более тяжелыми молекулами N_2 и O_2 .

На высотах максимума области F2 ионосферы

$$N \propto p = N(O) / (N(N_2) + N(O_2)).$$

Основными химическими реакциями потерь атомарного кислорода являются реакции с молекулами N_2 и O_2 [1]:



В табл. 2 приведены результаты расчета параметра p , $N(O)$, $N(N_2)$ и $N(O_2)$ для 00 и 12 ч на высоте 300 км по модели MSIS [23]. Расчет проведен для случая, когда индекс солнечной активности для конкретного дня и индекс СА, усредненный за три оборота Солнца, равнялись 100. Видно, что параметр p летом примерно в 2—2.5 раза больше, чем зимой как ночью, так и в дневные часы, а концентрации атомарного кислорода в летний и зимний периоды практически совпадают. Концентрация N_2 летом примерно в два раза больше, чем зимой. Такое поведение параметров нейтральной атмосферы можно объяснить сезонными вариациями параметров глобальной термосферной циркуляции. Увеличение концентрации N_2 на высотах максимума области F2 связано с разогревом и расширением термосферы и, как следствие, подъемом всех составляющих нейтральной атмосферы на большие высоты. Летом в дневные часы уменьшение концентрации атомарного кислорода связано с истечением его в плазмосферу, вследствие разогрева и расширения термосферы, с пе-

Таблица 2. Сезонные вариации параметров нейтральной атмосферы на высоте 300 км, рассчитанные по модели MSIS [23]

Сезон	00 ч			12 ч		
	$N(O)$, 10^{14} м^{-3}	$N(O_2) + N(N_2)$, 10^{14} м^{-3}	p	$N(O)$, 10^{14} м^{-3}	$N(O_2) + N(N_2)$, 10^{14} м^{-3}	p
март	3.67	0.54	6.79	5.18	0.83	6.24
сентябрь	3.43	0.63	5.44	5.01	0.96	5.22
июнь	3.30	0.32	10.3	4.30	0.44	9.77
декабрь	2.70	0.63	4.30	4.30	1.20	3.58

реносом O^+ в более холодное южное полушарие нейтральными ветрами, а также с увеличением концентрации N_2 и интенсивными потерями O^+ в реакции (5).

Для периодов весеннего и осенне-равноденствий значения N примерно одинаковы. Это подтверждается проведенным расчетом по модели MSIS (табл. 2). В эти периоды различие в атомарных и молекулярных составляющих нейтральной атмосферы составляет 10–20 %.

Сезонные вариации температуры электронов и ионов заключаются в следующем. Для летнего и зимнего солнцестояний T_e и T_i примерно равны. Различие между зимними и летними значениями T_e и T_i составляет не более 10–15 %. Для периодов осеннего и весеннего равноденствий различие между T_e и T_i не превышает 15–20 %. Такое сезонное поведение температур электронов и ионов согласуется с выводами [9, 10].

Выводы

1. Определены количественные характеристики вариаций параметров геокосмической плазмы в период роста солнечной активности. Наибольшие суточные вариации концентрации электронов до 5.5–8 раз наблюдаются в диапазоне высот 210–250 км и до 2–3 раз — на высотах выше 550 км.

2. Подтверждено, что в суточных зависимостях температуры электронов имеют место два максимума — утренний и вечерний. Такое поведение T_e в течение суток определяется величиной энергии, подводимой к электронам на высотах ниже максимума ионизации и вариациями потока тепла из плазмосфера в ионосферу

на высотах области F2 ионосферы. Суточные вариации температур электронов и ионов достигают 2.5–3 и 1.4–2 раза на высотах 240–250 км, для высот 470–530 км — 3.3 и 1.6 раза для T_e и T_i соответственно.

3. Влияние сезонной аномалии сводится к следующему. На высоте 250 км околополуденные зимние значения N превышают летние примерно в 3 раза, на высоте 310 км — в 2 раза, на высоте 360 км — в 1.5 раза. В ночное время сезонная аномалия не наблюдается. Сезонная аномалия обусловлена вариациями параметров глобальной термосферной циркуляции.

4. Для всех рассмотренных геофизических периодов сезонные вариации температур как электронов, так и ионов в период роста солнечной активности не превышают 10–20 %.

Авторы благодарят Е. И. Григоренко за интерес к работе и ценные замечания, а также Л. Я. Емельянова, А. Ф. Кононенко, И. Б. Склярова за проведение экспериментов на радаре НР, А. В. Болибок за первичную обработку экспериментальных данных.

- Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
- Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.—564 с.
- Захаров И. Г., Ляшенко М. В. Сравнение экспериментальных и модельных значений полного электронного содержания в ионосфере над Восточной Европой // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 3.—С. 280—286.
- Дзюбанов Д. А., Захаров И. Г., Ляшенко М. В. Моделирование полуденных значений электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным харьковского радара некогерентного рассеяния // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 2/3.—С. 28—35.

5. Дзюбанов Д. А., Захаров И. Г., Ляшенко М. В. Моделирование электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным радара некогерентного рассеяния в Харькове // Тр. 21 Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн. — Йошкар-Ола, 2005.—С. 190—193.
6. Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляров И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на Харьковском радаре некогерентного рассеяния // Радиотехника.—2004.—Вып. 136.—С. 102—108.
7. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.—190 с.
8. Ионосферно-магнитная служба. Современное состояние, задачи и перспективы / Под ред. О. И. Авдошина, А. Д. Данилова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987.—243 с.
9. Ляшенко М. В., Скляров И. Б., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период спада солнечной активности // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 45—58.
10. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 4.—С. 56—70.
11. Лысенко В. Н. Измерение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 3.—С. 365—368.
12. Михайлов А. В., Боенкова Н. М. Асимметрия годовых вариаций области F2 северного и южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия.—1980.—10, № 2.—С. 251—254.
13. Михайлов А. В., Островский Г. И. Явление зимнего возрастания электронной концентрации в ночной F2-области и его возможное объяснение // Геомагнетизм и аэрономия.—1980.—20, № 1.—С. 29—32.
14. Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975.—304 с.
15. Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состоянии методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
16. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 56—104.
17. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
18. Bhuyan P. K., Chamaa M., Subrahmanyam P., Garg S. C. Diurnal, seasonal and latitudinal variations of electron temperature measured by the SROSS C2 satellite at 500 km altitude and comparison with the IRI // Ann. Geophys.—2002.—20.—P. 807—815.
19. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci.—2001.—36, N 2.—P. 261—275.
20. Champion K. S. W. Dynamics and structure of the quiet thermosphere // J. Atmos. Terr. Phys.—1975.—37, N 6/7.—P. 915—926.
21. Evans J. V. Seasonal and sunspot cycle variations of F-region electron temperatures and protonospheric heat fluxes // J. Geophys. Res.—1973.—78, N 13.—P. 2344.
22. Farelo A. F., Herraiz M., Mikhailov A. V. Global morphology of night-time N_m F2 enhancements // Ann. Geophys.—2002.—20.—P. 1795—1806.
23. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res.—1987.—92.—P. 4649—4662.
24. Mikhailov A. V., Schlegel K. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere // Ann. Geophys.—2001.—19.—P. 783—796.
25. Nisbet J. S. Models of the ionosphere // Ionospheric Res. Lab., The Penn. State Univ.—1974.—P. 245—258.
26. Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // J. Geophys. Res.—2001.—106, N A7.—P. 12803—12819.
27. Rishbeth H., Sedgemore-Schultheiss K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion // Ann. Geophys.—2000.—18.—P. 945—956.
28. Salah J. E., Evans J., Wand R. N. Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill // Radio Sci.—1974.—9, N 2.—P. 231—238.
29. Schunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres: Physics, plasma physics, and chemistry. — Cambridge, 2000.—555 p.—(Cambridge atmospheric and space science series).
30. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. Diurnal and seasonal variations of h_m F2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001 // Ann. Geophys.—2004.—22.—P. 453—458.
31. Zang S., Holt J. M., Zalucha A. M. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987 // J. Geophys. Res.—2004.—109, N. A11311.

DIURNAL AND SEASONAL VARIATIONS OF IONOSPHERIC PLASMA PARAMETERS DURING RISE SOLAR ACTIVITY PERIOD

M. V. Lyashenko, V. A. Pulyaev, L. F. Chernogor

Quantitative characteristics of diurnal and seasonal variations of the main ionospheric plasma parameters for fourth geophysical periods (winter and summer solstices, vernal and autumnal equinoxes) in the height range from 210 to 1050 km during rise solar activity period (1997—1998) are obtained. Computer simulation of variations of a set of dynamic process parameters in the ionosphere is performed. Region features in the main geospace plasma parameters distribution are revealed or confirmed.

УДК 550.388

А. М. Гоков, О. Ф. Тирнов

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период магнитной бури 7—11 ноября 2004 г., обусловленные утренним солнечным терминатором

Надійшла до редакції 22.02.2006

Наведено результати експериментальних досліджень методом часткових відбиттів варіацій концентрації електронів у середньоширотній D-області іоносфери під час проходження ранішнього термінатора в період магнітної бурі 7—11 листопада 2004 р. Виявлено збільшення концентрації електронів приблизно на 450—700 % як в період проходження уранішнього термінатора, так і після нього. Для пояснення таких подій використана гіпотеза про висипання електронів з магнітосфери, стимульоване термінатором. Обговорюються основні характерні особливості, обумовлені сильним рентгенівським спалахом. Оцінено зміни швидкості іонізації.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что солнечный терминатор является мощным естественным источником различных возмущений в атмосфере и ионосфере Земли [1, 17—19]. В работах [2—4] на основе анализа данных о доплеровском смещении частоты низкочастотного передатчика во время прохождения терминатора через трассу распространения радиоволн было установлено, что терминатор обуславливает движущуюся вслед за ним квазипериодическую структуру электронной концентрации в ионосфере. В настоящее время подавляющая часть публикаций посвящена изучению параметров волновых возмущений в E- и F-области ионосферы и генерации турбулентности атмосферы [18, 19]. Влияние терминатора на параметры нижней части ионосферы (D-области) изучено значительно меньше, что обусловлено трудностью проведения систематических

измерений на протяжении часов и суток. Известны лишь эпизодические экспериментальные исследования [5, 8, 10, 22, 23]. Среди прочих эффектов нами [10, 22, 23] обнаружено увеличение плотности электронов N в среднеширотной D-области в период прохождения утреннего терминатора. В утренние часы из-за быстрого увеличения потока солнечной радиации прохождение терминатора сопровождается рядом физических процессов в атмосфере. Их энергетика достаточно велика. В работе [23] показано, что энергия и мощность теплового источника возмущений, вызываемого утренним терминатором, весьма большие. Поэтому в период и после прохождения утреннего терминатора следует ожидать ряд характерных изменений в ионосферной плазме (волновые возмущения различных периодов и длительностей, изменения ветрового режима, динамики концентрации электронов и т. д.) не только в области тени или

полутени, но и далеко за их пределами, которые, в зависимости от условий в ионосфере, атмосфере и магнитосфере Земли, будут в целом повторяться ото дня ко дню, обнаруживая при этом новые особенности, обуславливаемые другими факторами (циклические и спорадические изменения геомагнитной и солнечной активностей, солнечные вспышки, магнитны бури и др.). Изучение таких изменений в ионосферной плазме важно как для решения большого числа прикладных задач распространения радиоволн, так и для исследования физических и химических процессов в ней, поскольку эта часть ионосферы все еще остается плохо изученной.

Целью работы является экспериментальное исследование методом частичных отражений изменений концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время прохождения утреннего терминатора в период магнитной бури 7–11 ноября 2004 г. Рассмотрена возможность высыпания электронов из магнитосферы, стимулированного утренним терминатором.

ТЕХНИКА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Зондирование D-области ионосферы выполнялось с помощью радара частичных отражений (ЧО) радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина [27]. Рабочая частота радара составляла $f = 2.31$ МГц, длительность зондирующих импульсов $\tau = 25$ мкс с частотой повторения $F = 10$ Гц, импульсная излучаемая мощность $P_1 = 150$ кВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 40$. Амплитуды смеси ЧО-сигнала и шума обыкновенной и необыкновенной поляризаций (A_{mo} , A_{mx}) после оцифровки с частотой 10 Гц и шагом по высоте 3 км записывались на магнитный носитель. Для выделения амплитуд сигнала A_o , A_x на фоне шумов перед излучением каждого зондирующего импульса осуществлялись две выборки шума A_{no} , A_{nx} в полосе частот 50 кГц.

Измерения A_{mo} , A_{mx} и A_{no} , A_{nx} выполнены для диапазона высот 60–126 км в период магнитной бури 7–11 ноября 2004 г. в следующие периоды местного времени: 01.41–14.30 8 ноября, 01.50–24.00 9 ноября, 00.00–24.00 10 ноября,

00.03–24.00 11 ноября, 14.07–24.00 12 ноября, 00.07–24.00 13 ноября. Выполнены также подобные ЧО-наблюдения в невозмущенных условиях 3, 17 и 24 ноября 2004 г. Обработке и анализу подверглись регистрации длительностью по 7 ч: с 05.00 до 12.00 LT (за 1–1.5 ч до момента прохождения утреннего терминатора в D-области ионосферы и несколько часов после него).

Оценки средних значений интенсивностей ЧО-сигнала $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{no,nx}^2 \rangle$ определялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. По экспериментальным значениям $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ на фиксированных высотах с шагом $\Delta z = 3$ км вычислялось их отношение $R(z) = \langle A_x^2(z) \rangle / \langle A_o^2(z) \rangle$, используемое далее для получения высотно-временных профилей плотности электронов $N(z, t)$ (z — высота над поверхностью Земли, t — время) по методике дифференциального поглощения на основе алгоритма регуляризации [6]. Профили $N(z)$ вычислялись на интервалах усреднения в 10 мин для всего периода наблюдений с погрешностью, не превышающей 30 %. Уточнение профилей $N(z)$ проводилось по методике [7]: высотные профили $R(z)$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5$ и 10 мин, после чего проводилось их высотное слаживание по трем точкам. Полученные таким образом зависимости $\langle R(z) \rangle$ использовались для получения профилей $N(z)$.

Анализировались высотно-временные вариации $\langle A_{o,x}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{no,nx}^2 \rangle(z, t)$ и $N(z, t)$.

СВЕДЕНИЯ О КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЕ

До начала магнитной бури в период с 3 по 6 ноября 2004 г. по данным спутниковых наблюдений (<http://www.sec.noaa.gov/>) регистрировались плавные вариации параметров солнечного ветра. Значения концентрации, скорости и температуры частиц солнечного ветра изменялись в пределах $0.7\text{--}11 \text{ см}^{-3}$, $320\text{--}460 \text{ м/с}$ и $1.7\text{--}2.3$. Значения величины вектора индукции магнитного поля B изменялись в пределах 1.4–8.1 нТл, а его составляющая B_z изменялась от –7 до 6.5 нТл. Средние за сутки значения потоков протонов с энергиями, превышающими 1, 10 и 100 МэВ, составляли $(2\text{--}7) \cdot 10^4$, 2000–

4000 и $300-400 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ст}^{-1}$ соответственно, а электронов с энергией более 2 МэВ — $(1-5) \cdot 10^5 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ст}^{-1}$. Индекс K_p принимал значения от 0 до 4, а индекс геомагнитной активности D_{st} изменялся от -24 до 2 нТл.

В рассматриваемый период на спаде 23-го цикла солнечной активности имели место две сильнейшие магнитные бури с главными фазами 8 и 10 ноября 2004 г.: первая началась примерно в 18 ч 7 ноября и продолжалась примерно до 16 ч 8 ноября; вторая — началась в 22 ч 8 ноября и продолжалась примерно до 14 ч 11 ноября. Значения индекса K_p были увеличены до 8—9, что сопровождалось большими вариациями геомагнитного поля и уменьшением значений индекса D_{st} от -24 до -400. Энергетика бурь была близка к предельной. Энергию магнитной бури E_m удобно оценивать по минимальному значению индекса геомагнитной активности D_{st} из выражения [25]

$$E_m = \frac{3}{2} E_M \frac{D_{st}^*}{B_0},$$

где $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — энергия дипольного геомагнитного поля у поверхности Земли, $B_0 =$

= 30 мкТл — значение индукции геомагнитного поля на экваторе; скорректированное значение

$$D_{st}^* = D_{st} - b\sqrt{N_p m_p} v_{sw} + c,$$

$b = 5 \cdot 10^5 \text{ нТл} \cdot \text{Дж}^{-1/2} \text{м}^{3/2}$, $c = 20 \text{ нТл}$, N_p — концентрация протонов, m_p — масса протона, v_{sw} — скорость солнечного ветра. Энергия первой магнитной бури составила $1.7 \cdot 10^{16}$ Дж, (суммарная мощность $5.4 \cdot 10^{11}$ Вт); второй — $1.4 \cdot 10^{16}$ Дж ($1.3 \cdot 10^{12}$ Вт).

Начиная с 7 ноября более чем на 2—3 порядка увеличились потоки протонов и электронов. Повышенные по сравнению со спокойным периодом потоки высывающихся протонов регистрировались на спутнике GOES-8 до 17 ноября, а электронов (на спутнике GOES-12) — примерно до 20 ноября. Основные данные, характеризующие состояние космической погоды в этот период, приведены на рис. 1 (по данным www.solar.sec.noaa.gov); a — изменения индекса D_{st} , описывающие основные особенности геомагнитных бурь, и в первую очередь параметры кольцевого тока; \bar{b} — усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/ $\text{см}^2\text{с}\cdot\text{ср}$), измеренные на спутнике GOES-8

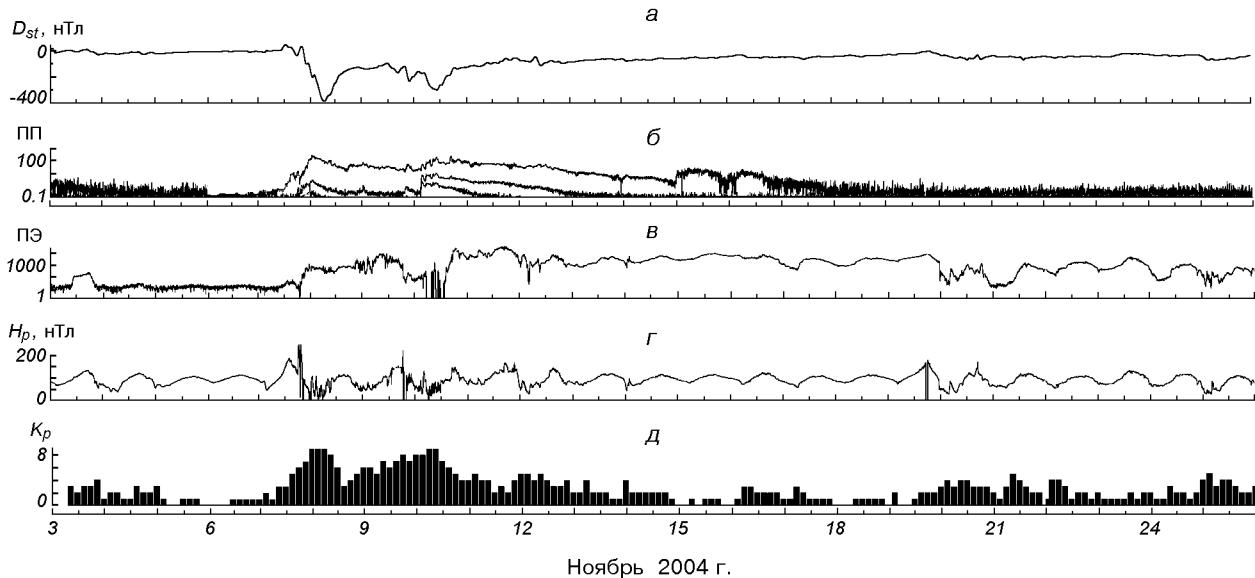


Рис. 1. Изменения параметров космической погоды в ноябре 2004 г.: a — изменения индекса геомагнитной активности D_{st} ; \bar{b} — усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/ $\text{см}^2\text{с}\cdot\text{ср}$), измеренные на спутнике GOES-8 (W75); \bar{c} — потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; \bar{d} — усредненные за 5 мин значения H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12; \bar{d} — значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p .

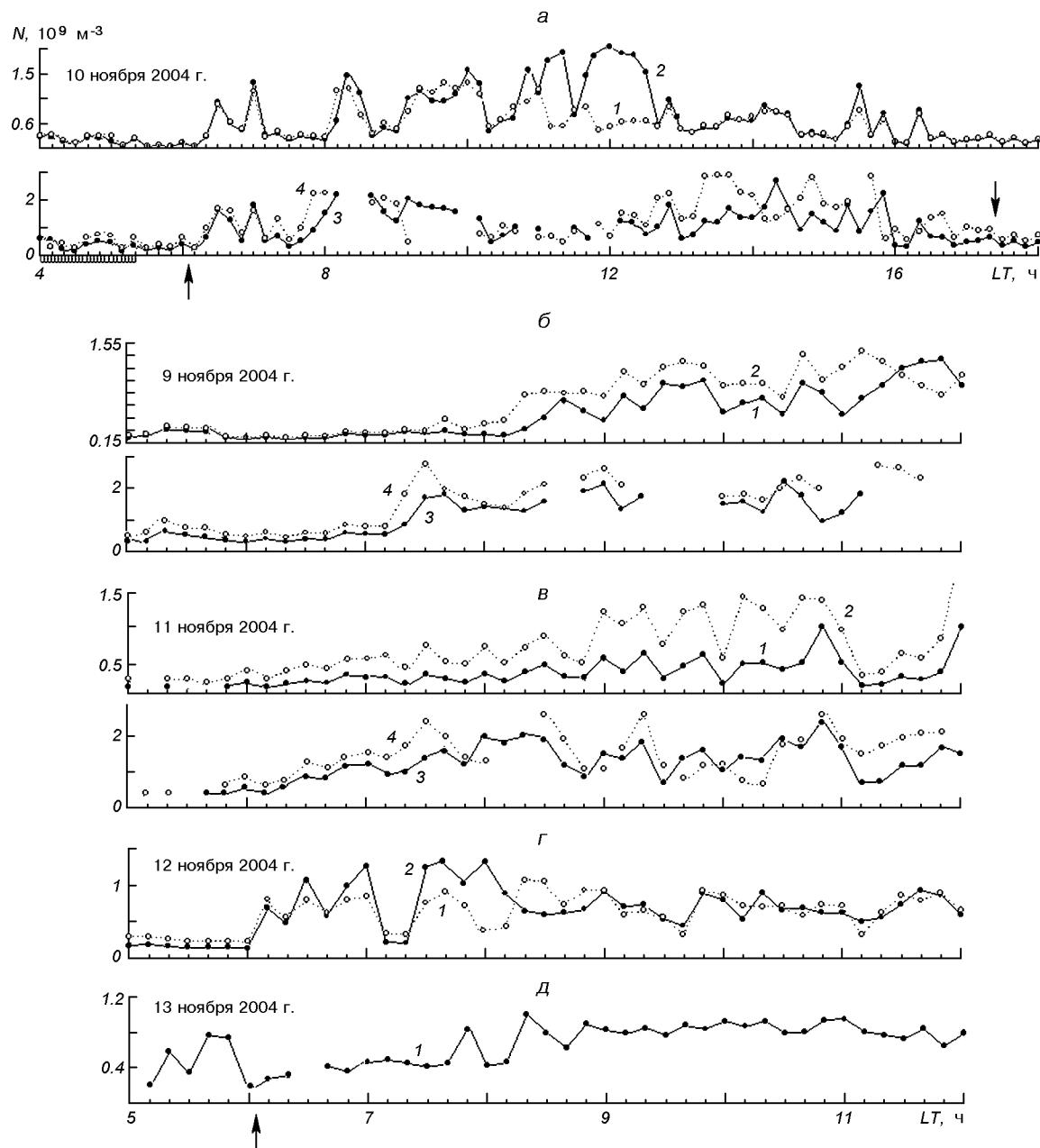


Рис. 2. Высотно-временные изменения концентрации электронов в период восхода Солнца в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь 9—13.11.2004 г.: кривая 1 — для высоты 78 км, 2 — 81 км, 3 — 84 км, 4 — 87 км. Заштрихованной областью на оси времени указано время рентгеновской вспышки X2.5. Стрелки — моменты восхода и захода Солнца на высоте 85 км

(W75); σ — потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; \bar{g} — усредненные за 5 мин значения H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12; δ — значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p .

В течение второй фазы магнитной бури 10 ноября значение плотности частиц солнечного ветра не превышало 15 см^{-3} , их скорость и температура уменьшились до 600 км/с и $3 \cdot 10^4 \text{ К}$ соответственно. Величина B_z на протяжении большей части суток имела отрицательное значение с локальным минимумом. Индекс K_p достиг максимального значения 9 в 9—15 ч, а к концу суток его значения уменьшились до 4. Значения индекса D_{st} имели локальный минимум -297 нТл в 14 ч, после чего наблюдалось их увеличение, характеризующее наступление фазы восстановления магнитной бури. В последующие дни наблюдалось постепенное восстановление параметров к их значениям в невозмущенных условиях (рис. 1). После 11 ноября основные параметры солнечного ветра, геомагнитного поля (рассмотренные выше) по данным спутниковых наблюдений соответствовали невозмущенным условиям.

Магнитные бури сопровождались рядом сильных вспышек: оптических (класса (1—3)p и 3b) и рентгеновских (класса M(2.3—8.9) и X2.5). Для нас интерес представляет сильнейшая рентгеновская вспышка класса X2.5 (она сопровождалась оптической вспышкой класса 3b), произшедшая 10 ноября в 04:04—04:10 (max) — 05:15 LT перед прохождением утреннего солнечного терминатора (восход Солнца на высоте 85 км имел место около 06:02 LT).

Для сравнения мы рассмотрим вариации концентрации электронов, полученные нами экспериментально на той же аппаратуре в невозмущенных условиях 3, 17 и 24 ноября 2004 г., а также во время магнитных бурь меньшей интенсивности 30—31 мая 2003 г. ($K_p \approx 5$) и 17 сентября 2003 г. ($K_p \approx 5—7$).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены высотно-временные изменения концентрации электронов 9—13 ноября

2004 г. Значения концентрации электронов получены для высотных уровней 78—87 км (заметим, что здесь и далее привязка по высоте соответствует заднему фронту отражения излученного импульса, т. е. к нижней границе рассеивающего объема). Рассмотрим их основные особенности. На рис. 2, a видны вариации $N(z, t)$ после сильнейшей рентгеновской вспышки класса X2.5. Вспышка окончилась за 45—50 мин до момента восхода Солнца на высотах D-области ионосферы (80—100 км). Во время вспышки эта часть ионосферной плазмы была еще не освещена Солнцем, и прямого попадания солнечного излучения не было. Квазипериодическое изменение концентрации электронов начались через 5—10 мин после момента прохождения солнечного терминатора. Увеличение N в течение 50—55 мин составляло в среднем 400—600 %; максимальная амплитуда составляла 800—1700 % на высотах 78 и 81 км и 450—550 % на высотах 84 и 87 км. Важно, что квазипериодические изменения N наблюдались в течение всего дня. В экспериментах 9, 11 и 13 ноября подобных изменений не было (рис. 2, b , c , d). В этих экспериментах отмечены в целом характерные для среднеширотной D-области ионосферы изменения концентрации электронов в период прохождения терминатора и после него (плавное или квазипериодические увеличения значений N через десятки минут) [8, 10, 22, 23]. В эксперименте 12 ноября квазипериодические изменения N в нижней части D-области начались, как видно из рис. 2, e , через несколько минут после момента прохождения терминатора в этой области ионосферы и продолжались более 180 мин.

Характерным для рассматриваемых экспериментов было то, что ЧО-сигналы часто регистрировались начиная с высоты 78 км (иногда — с 72 км), чего в обычных невозмущенных условиях мы не наблюдали. Вероятно, это может быть обусловлено увеличением обычно небольшой концентрации электронов и сильной турбулизацией (а также нестабильным состоянием) ионосферной плазмы в D-области ионосферы в период магнитной бури.

На рис. 3 приведены высотно-временные вариации концентрации электронов в период прохождения утреннего терминатора в среднеширотной D-области ионосферы до (3 ноября) и

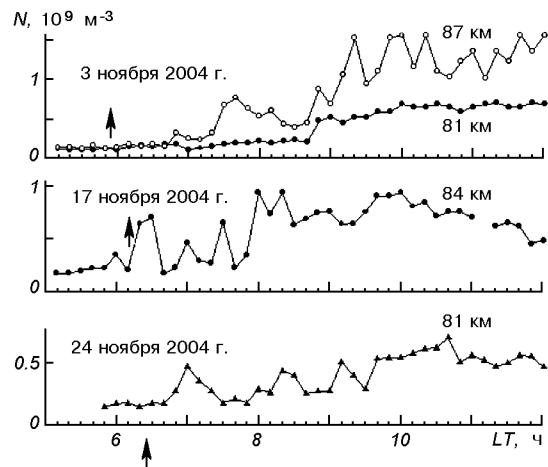


Рис. 3. Высотно-временные изменения концентрации электронов в период восхода Солнца 3, 17 и 24 ноября 2004 г. в среднеширотной D-области ионосферы. Стрелки — моменты восхода и захода Солнца на высоте 85 км

после (17 и 24 ноября) рассматриваемой магнитной бури. Видно, что 3 и 24 ноября поведение $N(z)$ соответствует типичному [8, 10, 22, 23]. 17 ноября через несколько минут после прохождения терминатора на высоте 84 км имело место увеличение концентрации электронов в среднем на 100—200 % (максимальная амплитуда 400 %) длительностью около 30 мин с последующими квазипериодическими изменениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работах [8, 10, 22, 23] было установлено, что примерно в 25 % случаев в невозмущенных условиях во время прохождения утреннего терминатора или вскоре после него (через 30—60 мин) в D-области ионосферы концентрация электронов увеличивается на 50—150 %. В эксперименте 17 ноября 2004 г. увеличение $N(z)$ было существенно большим (~400 %). Возможной причиной такого поведения $N(z)$ могли быть высыпания высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли. В пользу этой гипотезы говорит тот факт, что такие высыпания наблюдаются в течение 4—10 сут после магнитной бури [9, 26]. Анализ геофизических данных, приведенных на рис. 1, показывает наличие существенно повышенных значений потоков

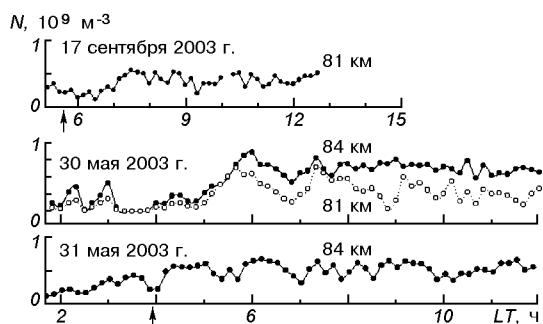


Рис. 4. Высотно-временные изменения концентрации электронов в период восхода Солнца во время магнитных бурь 30, 31 мая и 17 сентября 2003 г. в среднеширотной D-области ионосферы. Стрелки — моменты восхода и захода Солнца на высоте 85 км

высыпающихся электронов. Известно, что насыщенность радиационных поясов высокоэнергичными электронами в периоды магнитных бурь выше, чем в обычных условиях. Солнечный терминатор в этом случае выступает в качестве спускового механизма, инициирующего высыпания электронов из радиационного пояса. Другой вероятной причиной такого поведения $N(z)$ может служить передача возмущений в пространстве вследствие воздействия терминатора в предшествующий по времени и пространству (широте) области ионосферной плазмы.

В эксперименте 13 ноября (рис. 2, д) в нижней части D-области ионосферы наблюдались повышенные примерно на 200—400 % по сравнению с невозмущенными условиями значения $N(z)$ до времени прохождения утреннего терминатора. В последующее время поведение $N(z)$ соответствовало типичным невозмущенным условиям. Такое поведение $N(z)$, как и в предыдущем случае, могло быть вызвано высыпанием высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли после магнитной бури. В пользу этой гипотезы говорит тот факт, что в этот день мы часто регистрировали ЧО-сигналы, начиная с высотных уровней 72—75 км.

Анализ вариаций концентрации электронов во время двух других бурь (рис. 4) показал, что 17 сентября 2003 г. поведение $N(z)$ в D-области ионосферы было типичным — без выраженных изменений в период прохождения терминатора.

В другом случае, 31 мая 2003 г., наблюдалось квазипериодические всплески $N(z)$ в течение нескольких часов, начавшиеся примерно за 50–60 мин до момента прохождения терминатора. Максимальное увеличение $N(z)$ составляло 400–600 %.

Важно отметить, что увеличение концентрации электронов утром 10 ноября после мощной рентгеновской вспышки в несколько раз превысило увеличение $N(z)$ во время других рассмотренных магнитных бурь, а также в спокойные периоды.

Подсуммируем две основные особенности высотно-временных вариаций концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период прохождения утреннего терминатора во время магнитной бури:

— после мощной рентгеновской вспышки во время прохождения терминатора утром концентрация электронов существенно увеличивается по сравнению с ее увеличением в невозмущенных условиях: максимальное увеличение N составило примерно 800–1700 % на высотах 78 и 81 км и 450–550 % на высотах 84 и 87 км;

— во время магнитных бурь прохождение терминатора сопровождается увеличением концентрации электронов в 2–4 раза по сравнению с невозмущенными условиями (когда значения N увеличиваются на протяжении десятков минут).

Перечислим кратко процессы в D-области ионосферы, сопутствующие прохождению терминатора и попытаемся оценить, какие из них могут быть ответственны за наблюдаемое при прохождении терминатора и после него — увеличение концентрации.

1. Ионизация молекул NO рассеянным излучением в линии L_{α} . При этом изменение концентрации электронов составляет $\Delta N \leq 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-3}$, что не может объяснить наблюдаемое увеличение N .

2. Ионизация молекул $O_2 (^1\Delta_g)$ рассеянным солнечным излучением на длине волны 102.7–111.8 нм. При этом значение ΔN также не превышает 10^7 м^{-3} .

3. Движение областей больших градиентов параметров атмосферы в утренние часы. При этом изменение концентрации электронов может быть достаточно большим, но скорость пе-

редачи возмущений концентрации электронов по широте, по-видимому, недостаточна, чтобы обеспечивать наблюдаемые временные задержки.

4. Взаимодействие терминатора с неоднородностями атмосферы. Этот механизм достаточно инерционен и может обуславливать регистрируемые возмущения N с большой временной задержкой порядка десятков — сотен минут относительно момента прохождения терминатора. Отметим, что механизм еще очень мало изучен.

5. Радиационная неустойчивость, вызванная большим значением градиента потока радиации, который обусловлен «плоскослоистостью» коэффициента ее поглощения.

6. Усиление неустойчивости Рэлея — Тейлора в области терминатора.

7. Наличие магнитосопряженного терминатора, который вызывает поток фотоэлектронов из магнитосопряженной области.

8. Ионизация потоками энергичных электронов.

Из перечисленных причин наиболее вероятной причиной представляется поток электронов из радиационного пояса. Анализ данных о космической погоде (рис. 1) подтверждает эту гипотезу: в рассматриваемый период потоки высыпающихся из магнитосферы высокоэнергичных частиц (электронов и протонов) были повышенными в несколько раз по сравнению с невозмущенными условиями.

Роль среднеширотного высыпания заряженных частиц из магнитосферы неоднократно обсуждалась. В настоящее время уже не вызывает сомнений, что во время магнитных бурь и в течение примерно 5–14 сут после них высыпающиеся из радиационных поясов энергичные электроны с энергией $e \geq 40 \text{ кэВ}$ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт 45–60° [13–15, 20, 21, 23]. В этот период существенную роль в качестве источника ионизации в средних широтах играют также высокоэнергичные протоны. Роль корпускулярной ионизации среднеширотной D-области ионосферы подтверждена экспериментально [11–15, 20, 21, 23, 24]. Электроны и протоны могут играть заметную роль в ионизации нижней ионосферы на высотах 50–100 км ночью и в периоды возмущений различной природы естественного (сол-

нечные вспышки, магнитные бури, грозы, солнечный терминатор, сильные землетрясения и т. д.) и искусственного характера (мощные взрывы, старты ракет, работа мощных нагревных стендов в радиочастотном диапазоне, излучение высоковольтных линий и т. д.).

Высыпание может возникнуть в результате перераспределения захваченных частиц по питч-углам, к чему приводят либо искривления конфигурации силовых линий поля (геомагнитных ловушек), либо уменьшение «поперечной» энергии ε_{\perp} заряженных частиц. Кроме того, в процессе становления и релаксации возмущений тензора проводимости ионосферной плазмы поле поляризации E_p обладает и вихревым компонентом E_r . При прохождении терминатора возможны существенные изменения тензора проводимости ионосферной плазмы и вариации составляющих электрического поля E_p и E_r , а значит и ε_{\perp} .

Оценим параметры потоков на основе предложенного механизма о высыпании высокогенергичных электронов из радиационного пояса.

По экспериментальным значениям концентрации оценим скорость ионизации в невозмущенных и возмущенных условиях: $q_0 = \alpha_0 N_0^2$ и $q = \alpha N^2$ соответственно. На высотах $z > 75$ км в D-области ионосферы при рекомбинации электронов преимущественно с ионами NO^+ и O_2^+ коэффициент α изменяется примерно от 10^{-11} до $2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{с}^{-1}$ (далее полагаем $\alpha \approx \alpha_0$, т. е. пренебрегаем нагревом атмосферы при высыпании электронов). Плотность P_1 потока мощности P частиц с энергией ε определим как $P_1 \approx 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q = \varepsilon p$, где $\Delta q = q - q_0$, $\varepsilon_i \approx 35$ эВ — энергия одного акта ионизации, Δz — диапазон высот эффективного поглощения потока p электронов с данной энергией ε (это выражение

справедливо, если пренебречь распределением высыпающихся электронов по энергиям) [20, 21]. Мощность P и энергию E электронов, высыпающихся на площади S при длительности высыпаний Δt , можно оценить из соотношений $P = P_1 S$ и $E = P \Delta t$. В расчетах на основе анализа ЧО-сигналов и $N(z, t)$ полагали $S = 10^{14} \text{ м}^2$.

Результаты расчетов для обсуждаемых экспериментов приведены в таблице. Для удобства расчетов принималось $\Delta z = 10$ км, полагалось также, что энергия высыпающихся электронов $\varepsilon > 40$ кэВ, что вполне обоснованно. Расчеты показали, что значения потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время магнитных бурь составляли $p \approx (0.6—0.8) \cdot 10^9 \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Значения потоков электронов 10 ноября после сильной рентгеновской вспышки оказались в несколько раз выше, чем в другие периоды. Результаты расчетов хорошо согласуются с известными данными о потоках электронов, полученными экспериментально или оцененными во время возмущений различной природы [9, 11, 13—15, 20, 21, 23, 24]. Плотности потоков электронов и их энергетические характеристики в соответствии с теоретическими расчетами [20] вполне могут обеспечить наблюдаемое увеличение концентрации электронов на высотах 78—87 км.

выводы

1. Экспериментально обнаружено существенное по сравнению с невозмущенными условиями увеличение концентрации электронов в течение примерно 50—60 мин в среднеширотной D-области ионосферы примерно через 5—10 мин после момента прохождения утреннего термина-

Параметры потоков электронов

Дата	$z,$ км	$N_0,$ 10^8 м^{-3}	$N,$ 10^8 м^{-3}	$q_0,$ $10^6 \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$	$q,$ $10^6 \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$	$\Delta q,$ $10^6 \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$	$P_1,$ $\text{мкДж} \cdot \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$	$p,$ $10^9 \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$	$\varepsilon,$ МэВ	$P,$ ГВт	$E,$ 10^{-12} Дж	$\Delta t,$ с
10.11.2004	81	1.3	10.5	0.17	11	10.8	37	1.7	0.15	3.7	13	3600
11.11.2004	87	4.5	20	2.0	40	38	129	8.8	0.1	12.9	46	3600
12.11.2004	84	2.5	14	0.6	19.6	19	65	2.9	0.15	6.5	23	3600
13.11.2004	78	1.8	7.6	0.3	5.6	5.3	18	0.8	0.15	1.8	4.3	2400
17.11.2004	84	1.8	7.6	0.3	5.6	5.3	18	0.8	0.15	1.8	8.6	4800
31.05.2003	84	1.5	6.5	0.23	4.23	4.0	14	0.6	0.15	1.4	5.0	3600

тора после мощной рентгеновской вспышки: максимальное увеличение N составило примерно 800–1700 % на высотах 78 и 81 км и 450–550 % на высотах 84 и 87 км.

2. В период магнитных бурь обнаружено увеличение значений концентрации электронов примерно в 2–4 раза по сравнению с невозмущенными условиями во время характерных для терминаторного периода изменений концентрации электронов (в периоды увеличения значений N в течение десятков минут).

3. В рамках гипотезы о высыпании электронов из магнитосферы в период магнитной бури оценены энергетические характеристики потоков заряженных частиц и показана возможность стимулированного терминатором высыпания электронов. Оказалось, что значения потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время магнитных бурь составляли $p \approx (0.6 - 8.8) \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Значения потоков электронов полученные для 10 ноября 2004 г. после сильной рентгеновской вспышки, оказались в несколько раз выше по сравнению с другими периодами. Полученные значения потоков хорошо согласуются с теоретическими оценками и с известными данными о потоках электронов, полученными экспериментально во время возмущений различной природы.

Авторы благодарят А. И. Гритчину за помощь в проведении экспериментов и К. П. Гармаша за предоставленную программу расчета концентрации электронов с применением метода регуляризации.

1. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжев В. И. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1988.—26, № 5.—С. 837—841.
2. Безродный В. Г., Блиох П. В., Фалькович И. С. и др. О неоднородностях нижней ионосферы, движущихся за терминатором // Тез. докл. семинара КАПГ по физике страто-мезосферы и нижней ионосферы. — М.: Наука, 1977.—С. 52.
3. Белей В. С., Галушко В. Т., Ямпольский Ю. М. Экспериментальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений на параметры КВ радиосигнала. — Харьков, 1983.—16 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т радиоэлектроники; № 231).
4. Белей В. С., Галушко В. Т., Ямпольский Ю. М. и др. Распространение радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1983.—82 с.

5. Беликович В. В., Бенедиков Е. А. Искусственные периодические неоднородности в нижней части Е-области на восходе и заходе Солнца // Геомагнетизм и аэрономия.—1986.—26, № 5.—С. 837—841.
6. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.
7. Гоков А. М., Пивень Л. А., Федоренко Ю. П. К определению электронной концентрации D-области ионосферы по амплитудным измерениям частично отраженных сигналов // Радиотехника.—1990.—Вып. 93.—С. 108—111.
8. Гоков А. М., Гритчин А. И. Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиошумов // Геомагнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 2.—С. 169—172.
9. Гоков А. М., Гритчин А. И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Космические исследования.—1996.—34, № 6.—С. 585—589.
10. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Некоторые особенности динамики нижней ионосферы, обусловленные солнечным терминатором // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—2002.—№ 12.—С. 26—32.
11. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события SPE // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК.—2003.—9, № 2.—С. 86—90.
12. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации электронной концентрации в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 5/6.—С. 12—21.
13. Кнут Р., Вюрцбергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэрономия.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
14. Кнут Р., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1977.—17, № 5.—С. 854—861.
15. Лаштовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэрономия.—1976.—16, № 6.—С. 1018—1025.
16. Ляцкий В. Б., Малыцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
17. Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. — Алма-Ата: Наука, 1983.—192 с.
18. Сомсиков В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия.—1991.—31, № 1.—С. 1—12.
19. Сомсиков В. М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэро-

- номия.—1992.—32, № 3.—С. 55—59.
20. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—3, N 2.—P. 191—197.
21. Danilov A. D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagnetism and Aeronomy.—1999.—1, N 3.
22. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Some features of lower ionosphere dynamics caused by the morning solar terminator // J. Atmos. Electricity.—2002.—22, N 1.—P. 13—21.
23. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Peculiarities of the middle latitude ionospheric d-region dynamics, caused by the solar terminator // Telecommunications and Radio Engineering.—2003.—59, N 3/4.—P. 159—172.
24. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Middle latitude ionospheric d-region responses to solar events as investigated by partial reflection technique // Telecommunications and Radio Engineering.—2003.—59, N 3/4.—P. 114—134.
25. Gonzalez W. D., Jozely J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99A, N 4.—P. 5771—5792.
26. Lauter E. A. The post-storm ionization in the upper mesosphere // J. Meteorol.—1977.—N 6.—P. 67—73.
27. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turk. J. Phys.—1994.—18.—P. 1260—1265.
-
- ELECTRON DENSITY VARIATIONS
IN THE IONOSPHERIC D-REGION
AT MID-LATITUDES DURING MAGNETIC STORM ON
7—11 NOVEMBER 2004, CONDITIONED BY MORNING
SOLAR TERMINATOR**
- A. M. Gokov, O. F. Tyrnov*
- We present the results of experimental investigations of the electron density variations in the middle latitude ionospheric D-region during passing morning solar terminator in the period of magnetic storm on 7—11 November 2004 by the partial reflection radar. It is found an enhancement of the electron density of about 450—700 % both in the period of passing morning solar terminator and during tens minutes after this event. To explain such events, a hypothesis on electron precipitations from the magnetosphere stimulated by morning solar terminator is used. Estimation of the ionization rate is made. On the basis of the experimental data on electron density changes over the electron precipitation periods, the corresponding fluxes are estimated: $p \approx (0.6—8.8) \cdot 10^9 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Rajesh K. Mishra¹, Rekha Agarwal Mishra²

¹Computer and I. T. Section, Tropical Forest Research Institute, Jabalpur (M. P.) India 482 021

²Department of Physics, Govt. Autonomous Model Science College, Jabalpur (M. P.) 482 001, India

E-mail: rkm_30@yahoo.com

Interplanetary transients causing unusual anisotropic wave trains in CR intensity

Received 17.04.06

The study deals with short-term variations of cosmic ray intensity during the interval from 1991 to 1994. The occurrence of a large number of high and low amplitude anisotropic wave train events (HAEs/LAEs) is examined. The correlation between these unusual anisotropic events and SWP/IMF parameters is studied to locate the possible cause responsible for occurrence of these types of events. Our results indicate that the time of maximum of diurnal variation shows a remarkable systematic shift towards earlier hours for LAE; whereas it remains in the 18-Hr direction for HAE. It is also noteworthy that the occurrence of low as well as high amplitude anisotropic wave train events is independent of nature of IMF polarity.

INTRODUCTION

Special type of consecutive days having abnormally high or low amplitudes in daily variation of cosmic rays (CR) have been reported several times earlier with explanation of sources and sinks in anti-garden-hose and garden-hose directions. The existence of high and low amplitude anisotropic wave trains was revealed through the long-term study of cosmic ray intensity. The average characteristics of cosmic ray diurnal anisotropy are adequately explained by the co-rotational concept [6, 7, 26]. This concept supports the mean diurnal amplitude in space of 0.4 % along the 18 Hr direction using the worldwide neutron monitor data. However, the observed day-to-day variation both in amplitude and time of maximum, and the abnormally large amplitudes or abnormally low amplitudes of consecutive days, cannot be explained in corotational terms. Periods of unusually large amplitude often occur in trains of several days. The amplitudes of these interesting variations cannot be explained by the corotation effect, which usually predicts values of 0.4 %. Moreover, the maximum intensity of

diurnal anisotropy has not appeared in the direction of 18 Hr, which is the nominal co-rotational phase [23, 28].

The characteristics of the diurnal/semi-diurnal/tri-diurnal variation of cosmic rays and their variability have been continuously studied by many workers [34]. A systematic anti-clockwise shift of diurnal anisotropy was observed by Duggal and Pomerantz [9] over a period of days during the study of large amplitude anisotropic diurnal wave trains. The occurrence of trains of continuous days having unusually high diurnal amplitude with a phase shift towards later hours was observed by Mathews et al. [21] during both quiet and disturbed days. These trends are caused due to a large decrease of cosmic ray intensity along the garden-hose direction rather than the streaming along the anti-garden-hose direction. According to Rao et al. [29], the phase of diurnal anisotropy shifts towards later hours due to enhanced radial streaming. The trains of days having negligibly small diurnal amplitude are also observed [1].

A large day-to-day variability is exhibited in the solar diurnal variation of cosmic ray intensity [5].

This variability is a reflection of the continually changing conditions in the interplanetary space [10]. The systematic and significant deviations in the amplitude/phase of the diurnal/semi-diurnal anisotropy from the average values are known to occur in association with strong geomagnetic activity [17]. Rao et al. [29] showed that the enhanced diurnal variation of high amplitude events exhibits a maximum intensity in space around the anti-garden hose direction and a minimum intensity around the garden hose direction. Number of high amplitude events was observed with a significant shift in the diurnal time of maximum to later hours or earlier hours [18–20]. Such days are of particular significance when occur during undisturbed solar/interplanetary conditions, as the superposed universal time effects are expected to be negligible.

Jadhav et al. [14] studied the behaviour of semi-diurnal anisotropy for LAE by comparing the average semi-diurnal amplitude for each event with 27-day or annual average semi-diurnal amplitude. They found that there is no significant difference between the two wave trains. For these LAE cases the semi-diurnal amplitude is found to be normal, which shows that the diurnal and semi-diurnal anisotropies are not related to each other for these LAEs.

The average amplitude of diurnal and semi-diurnal anisotropy are found to be larger than normal during the initial phase of the stream while it is smaller as compared to the normal during the decreasing phase of the stream and phase is observed to remain almost constant [2], which infers that the diurnal as well as semi-diurnal variation of galactic cosmic ray intensity may be influenced by the solar polar coronal holes. The changes were also observed in the amplitude and phase during the high-speed solar wind streams (HSSWS) coming from coronal holes [12, 25]. The diurnal variation might be influenced by the polarity of the magnetic field [27], so that the largest diurnal variation is observed during the days when the daily average magnetic field is directed outward from the Sun.

The significant variations were observed in the amplitude and phase of the diurnal anisotropy with reversal of the average IMF in the alternate sectors. Due to the presence of North-South gradient in cosmic ray density, density increasing

southward, i. e., below the equatorial plane of the Sun [11, 32, 33] the expected diurnal amplitude will be larger and time of maximum shifts towards earlier hours for positive IMF, i. e., away from the Sun as compared to the days having negative IMF polarity, i. e., towards the Sun. It was observed by Mavromichalaki [22] that an enhanced mean diurnal amplitude correlates with positively directed sectors; whereas, the amplitude is found to decrease during sector boundaries.

The harmonics of CR intensity have also been associated with geomagnetic conditions. The amplitude of diurnal anisotropy increases with increasing geomagnetic activity. The time of maximum is found to shift towards earlier hours as compared to the average values for higher values of geomagnetic field variation indices, i. e., K_p or A_p [30]. This trend has been found to vary with the change in the solar poloidal magnetic field after 1971, i. e., the time of maximum is found to shift towards later hours with the increase in A_p -index [3, 16].

The three harmonics of HAE/LAE during 1991–94 and their correlation with IMF/SWP parameters are presented in this paper to investigate the possible cause responsible for the occurrence of these types of unusual events.

METHOD OF ANALYSIS

To study the characteristics of HAE/LAE the events are identified using the hourly plots of cosmic ray intensity recorded at ground-based neutron monitoring stations and selected 16 unusually high amplitude anisotropic wave train events (HAEs) and 13 unusually low amplitude anisotropic wave train events (LAEs) during 1991–1994. The days having abnormally high amplitude or unusually low amplitude for five or more consecutive number of days were selected as HAE/LAE. The pressure corrected hourly neutron monitor data after applying trend correction are harmonically analyzed to have amplitude (%) and phase (Hr) of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies of cosmic ray intensity for HAE/LAE. The data related to interplanetary magnetic field (IMF) and solar wind plasma (SWP) parameters were also investigated.

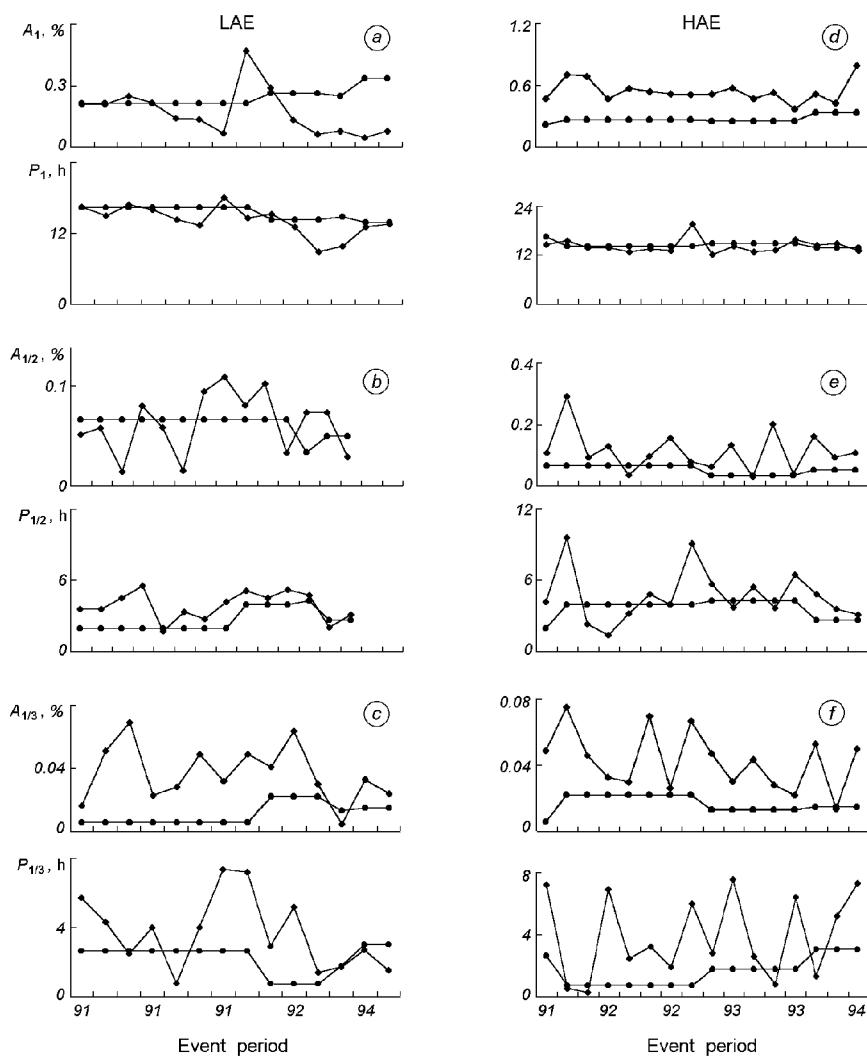


Fig. 1. Amplitudes A_1 , $A_{1/2}$, $A_{1/3}$ and phases P_1 , $P_{1/2}$, $P_{1/3}$ of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies (diamonds) alongwith quiet day annual average values (dots) for LAEs and HAEs during the period from 1991 to 1994

RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1, *a—c* give the amplitude and phase of the diurnal (A_1 , P_1), semi-diurnal ($A_{1/2}$, $P_{1/2}$) and tri-diurnal ($A_{1/3}$, $P_{1/3}$) anisotropies of cosmic ray intensity for each LAE alongwith the corresponding quiet-day annual average values. The amplitude of the diurnal anisotropy as depicted in Fig. 1, *a* is observed to remain significantly low as compared to the quiet day annual average value for majority of the event throughout the period; whereas, the phase has a tendency to shift towards

earlier hours as compared to quiet day annual average value for majority of the event. Further, the amplitude of the semi-diurnal anisotropy as depicted in Fig. 1, *b* has no definite trend; whereas, the phase shifts towards later hours as compared to quiet day annual average values for majority of the events. Furthermore, the amplitude of the tri-diurnal anisotropy as shown in Fig. 1, *c* is significantly higher as compared to the quiet day annual average value throughout the period; whereas, the phase has a tendency to shift towards later hours as compared to quiet day annual

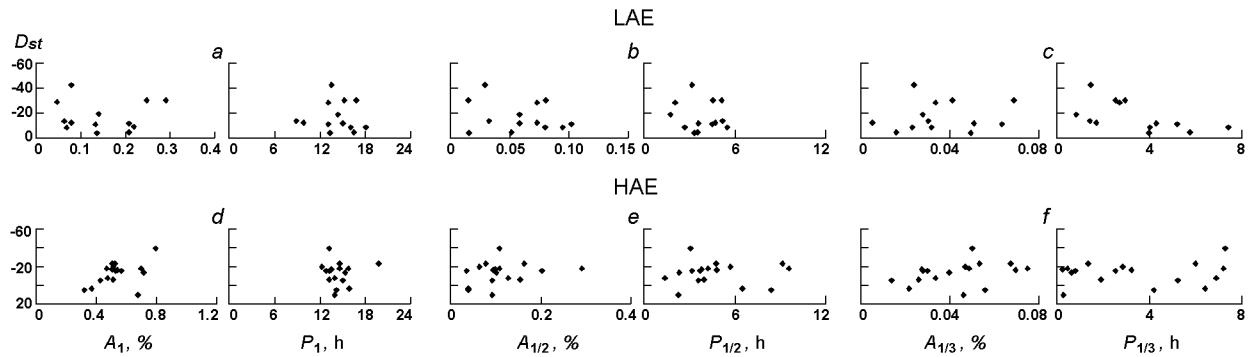


Fig. 2. Amplitudes A_1 , $A_{1/2}$, $A_{1/3}$ and phases P_1 , $P_{1/2}$, $P_{1/3}$ of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies for each LAE and HAE alongwith D_{st} -index

average value for majority of the events.

Fig 1, *d*–*f* give the amplitude and phase of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies of cosmic ray intensity for each HAE alongwith the corresponding quiet-day annual average values. The amplitude of the diurnal anisotropy as depicted in Fig. 1, *d* is observed to remain significantly high as compared to the quiet day annual average value throughout the period; whereas, the phase remains in the corotational direction for majority of the event. Further, the amplitude of the semi-diurnal anisotropy as depicted in Fig. 1, *e*, is significantly large as compared to the quiet day annual average values for majority of the events; whereas, the phase has no definite trend for the semi-diurnal anisotropy. Furthermore, the amplitude of the tri-diurnal anisotropy as shown in Fig. 1, *f* is significantly higher for all HAEs as compared to the quiet day annual average value throughout the period. As it is quite apparent from these plots, the tri-diurnal time of maximum has a tendency to shift towards later hours as compared to quiet day annual average value for majority of the events; which is in good agreement with the low amplitude wave trains where it has also shifts towards later hours for the majority of the events.

Fig. 2, *a*–*c* show the amplitude and phase of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies for each LAE alongwith the corresponding average D_{st} values. The amplitude of the diurnal anisotropy as shown in Fig. 2, *a* is observed to remain low for more negative values of D_{st} ; whereas, the phase shifts towards earlier hours. It was observed that

the shift in phase of diurnal anisotropy towards earlier hours is independent of the decrease in the values of D_{st} in respective of events. Further, the amplitude of the semi-diurnal anisotropy as shown in Fig. 2, *b* is found to remain low for more negative values of D_{st} likewise the amplitude of the diurnal anisotropy; whereas, the phase has no definite trend as amount of scattering is very large. Furthermore, the amplitude of the tri-diurnal anisotropy as shown in Fig. 2, *c* is found to be lower for more negative values of D_{st} likewise the amplitude of the diurnal and semi-diurnal anisotropy, showing a correlation between the amplitude of the first three harmonics and D_{st} -index for the low amplitude anisotropic wave train events. However, no significant correlation between tri-diurnal phase and D_{st} -index was found, as the scattering is very large.

Fig. 2, *d*–*f* give the amplitude and phase of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies for each HAE alongwith the corresponding average D_{st} values. The amplitude of the diurnal anisotropy as shown in Fig. 2, *d* is observed to remain high for more negative values of D_{st} ; whereas, the phase remains in the corotational direction. Further, the amplitude of the semi-diurnal anisotropy as shown in Fig. 2, *e* is found to remain high for more negative values of D_{st} likewise the amplitude of the diurnal anisotropy; whereas, the phase has no definite trend as amount of scattering is very large. Furthermore, the amplitude of the tri-diurnal anisotropy as shown in Fig. 2, *f* is found to be high for more negative values of D_{st} likewise the

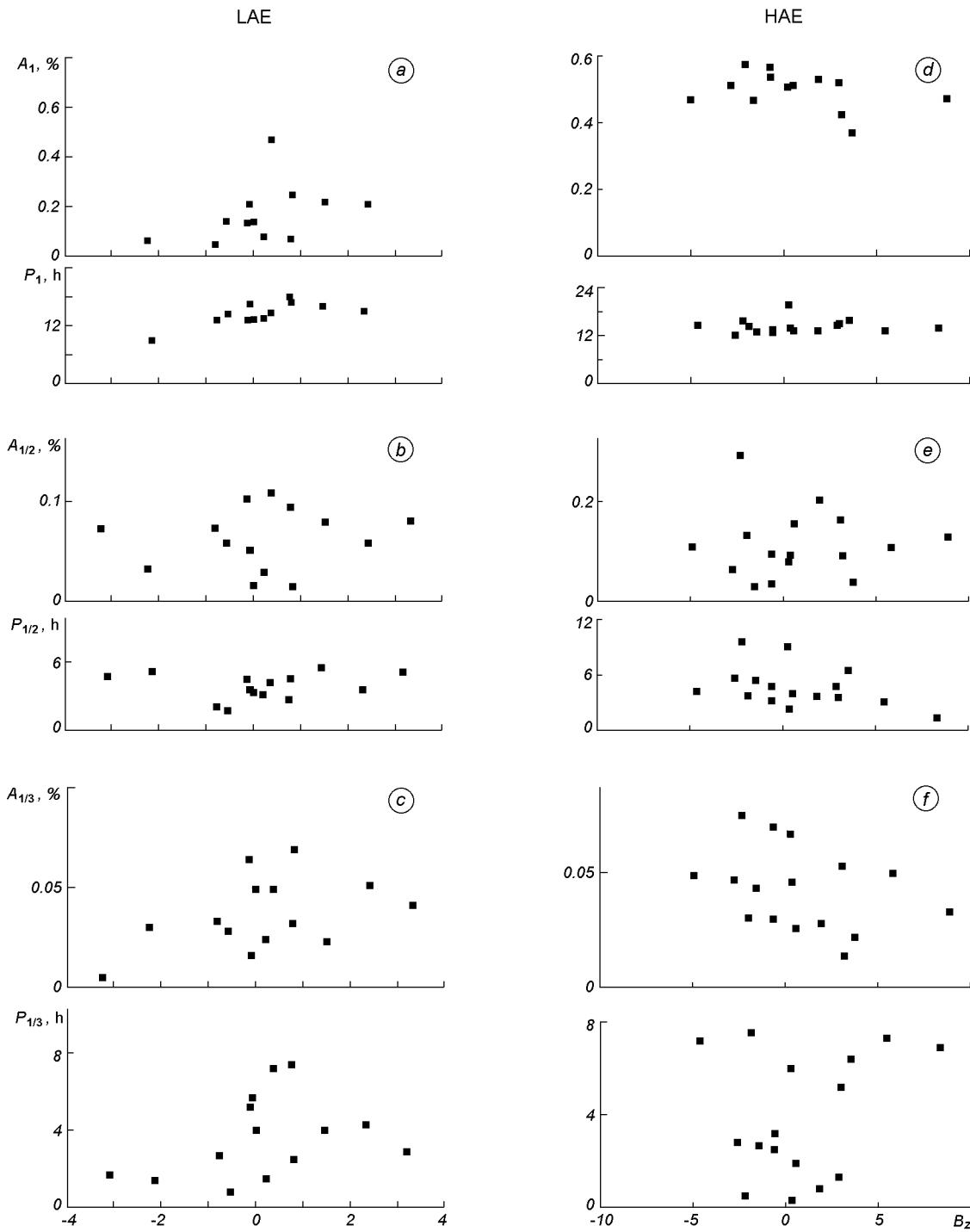


Fig. 3. Amplitudes A_1 , $A_{1/2}$, $A_{1/3}$ and phases P_1 , $P_{1/2}$, $P_{1/3}$ of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies for each LAE and HAE with the variation in associated values of B_z during the period from 1991 to 1994

amplitude of the diurnal and semi-diurnal anisotropy, pointing to a correlation between the amplitude of the first three harmonics and D_{st} -index for the high amplitude anisotropic wave train events. However, no significant correlation between tri-diurnal phase and D_{st} -index was found, as the scattering is very large.

Fig. 3, *a*–*c* give the amplitudes (%) and phases (Hr) of diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies for all the LAE events with the variations in the associated values B_z of z-component of interplanetary magnetic field. It is observable from these plots that the amplitude of the diurnal anisotropy for positively directed IMF ($+B_z$) is significantly large for majority of the events; whereas, the amplitude remains significantly low for negatively directed IMF ($-B_z$) for most of the LAE events. The diurnal time of maximum for both positive and negative polarity of B_z has a tendency to shift towards earlier hours as compared to co-rotational value for all the LAE events, which is in good agreement with the earlier trends reported by Hashim and Bercovitch [11] and Kannanen et al. [15], for the period 1967–1968, i. e., for positive or away polarity of IMF, the amplitude is high and phase shifts to early hours; whereas, for negative or towards polarity of IMF the amplitude is low and phase shifts to early hours as compared to co-rotational value. For semi-diurnal anisotropy the amplitude of semi-diurnal anisotropy is evenly aligned for both positive and negative polarity of IMF for all LAEs. Further, for tri-diurnal anisotropy the amplitude is evenly aligned for both positive and negative polarity of IMF for majority of the LAEs.

Fig. 3, *d*–*f* give the amplitudes (%) and phases (Hr) of diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropies for HAEs with the variations in the associated values of B_z . It is quite apparent from these plots that the amplitude of diurnal anisotropy is evenly aligned for both positive and negative polarity of IMF for all HAEs. The amplitude of diurnal anisotropy for both towards and away polarity is higher and phase shifts towards earlier hours as compared to the co-rotational values for most of the HAEs, which is in partial agreement with the earlier findings [11, 15] for the period 1967–1968. In case of semi-diurnal anisotropy the amplitude is evenly aligned for both positive and negative polarity of IMF for all HAEs. Further, for

tri-diurnal anisotropy the amplitude is evenly aligned both positive and negative polarity of IMF for most of the HAEs.

An enhanced mean amplitude of diurnal anisotropy correlates with positively directed sectors while the amplitude of the diurnal anisotropy seems to decrease during sector boundaries [22], which significantly differs from our findings; that is the occurrence of low as well as high amplitude anisotropic wave train events is independent of nature of IMF polarity. The trends we found in this study for LAE reveal that for both away and towards polarity days the time of maximum for diurnal anisotropy shifts towards earlier hours with an exception for one event; whereas, for HAE during both away and towards polarity days the diurnal time of maximum shifts towards earlier hours with an exception for one event.

Fig. 4 shows the frequency histogram of solar wind velocity for all HAEs/LAEs. It is quite observable from these plots that the majority of the HAE/LAE events have occurred when the solar wind velocity lies in the range from 400 to 500 km/s, i. e., being nearly average. Usually, the velocity of high-speed solar wind streams (HSSWSs) is 700 km/s [25]. Therefore, it may be deduced from these plots that HAE/LAE events are not caused either by the HSSWS or by the sources on the Sun responsible for producing the HSSWS such as polar coronal holes (PCH) etc. Thus, we may infer that HAEs/LAEs are weakly dependent on solar wind velocity, which is in agreement with earlier findings [25] and significantly contradicts the earlier results reported

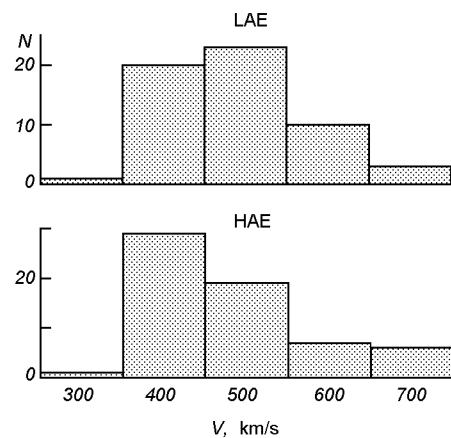


Fig. 4. The frequency histogram of the solar wind velocity for all LAEs and HAEs

by Iucci et al. [13] and Dorman et al. [8], that the solar diurnal amplitude is enhanced during the HSSWSs coming from coronal holes. According to Ahluwalia and Riker [4], there is no relation between solar wind speed and diurnal variation in high rigidity region. The modulation of solar diurnal anisotropy is weakly or less dependent on the solar wind velocity [25]. No significant difference was found between the variation of diurnal vectors in high-speed days and the days; when, the speed is normal. Recently Shrivastava [31] concluded that both the flare generated streams (FGS) and co-rotating streams (CS) produce short-term transient decreases in cosmic ray intensity for the period from 1991 to 1996; whereas medium range (5- to 6-day duration) solar wind streams are found to be more effective in producing cosmic ray transient decrease. On close inspection of both data on neutron monitor (NM) and muon telescope (MU), Munakata et al. [24] found that the modulation of the diurnal anisotropy by the high speed solar wind streams may occur through two different processes; one is that many already reported that with the development of the HSSWSs the diurnal waves are enhanced, and are observed by both NM and MU, and the other is that along with the decline in the HSSWSs the diurnal waves are again enhanced, and are rather observed by NM.

CONCLUSIONS

On the basis of our investigation the following conclusions are made:

1. The diurnal time of maximum is shifted to earlier hours as compared with the quiet day annual average for LAE; whereas it remains in the co-rotational direction as compared to the quiet day annual average for HAE for majority of the events.

2. The phase of semi-diurnal anisotropy for LAE shifts towards earlier hours as compared to the quiet day annual average for majority of the events; whereas, it has no definite trend in case of HAE. However the phase of tri-diurnal anisotropy for LAE as well as for HAE is shifted to later hours as compared to the quiet day annual average for majority of the events.

3. The occurrence of low and high amplitude

anisotropic wave train events is independent of nature of IMF polarity. The diurnal time of maximum for both positive and negative polarity of B_z has a tendency to shift towards earlier hours as compared to co-rotational value for all the LAE events; whereas, it shifts towards earlier hours as compared to the co-rotational values for most of the HAEs.

4. The occurrence of LAE/HAE is dominant when the solar wind velocity is being nearly average. This reveals that HAE/LAE events are not caused either by the HSSWS or by the sources on the Sun which are responsible for producing the HSSWS such as polar coronal holes (PCH) etc. Thus, we may infer that HAEs/LAEs are weakly dependent on solar wind velocity.

5. First three harmonics of diurnal amplitude significantly correlates with D_{st} -index. Diurnal time of maximum shifts towards earlier hours for LAE; whereas, it remains in the co-rotational direction for HAE. The shift in phase towards earlier hours for LAE is independent of D_{st} -index.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are indebted to various experimental groups, in particular, Prof. Margret D. Wilson, Prof. K. Nagashima, Miss. Aoi Inoue and Prof. J. H. King for providing the data.

1. Agrawal S. P. // Ph. D. Thesis. — Ahmedabad: Gujarat University, 1973.
2. Agrawal S. P. Study of tri-diurnal variation of galactic cosmic radiation // J. Geophys. Res.—1981.—86.—P. 10115.
3. Agrawal S. P., Singh R. L. Critical study of the diurnal and semi-diurnal variation of cosmic ray intensity on day-to-day basis // 14th Int. Cosmic Ray Conf.—1975.—3.—P. 1253.
4. Ahluwalia H. S., Riker J. F. Secular changes in the upper cut-off rigidity of the solar diurnal anisotropy of cosmic rays // Planet. Space Sci.—1987.—35.—P. 39.
5. Ananth A. G., Agrawal S. P., Rao U. R. Study of CR diurnal variation on a day-to-day basis // Pramana.—1974.—3.—P. 74.
6. Axford W. I. The modulation of galactic cosmic rays in the interplanetary medium // Planet. Space Sci.—1965.—13.—P. 115.
7. Axford W. I. Anisotropic diffusion of solar cosmic rays // Planet. Space Sci.—1965.—13.—P. 1301.
8. Dorman L. T., Kaminer N. S., Kuzmicheva A. E., Mymrina N. V. Features of diurnal variations of cosmic rays in high-speed streams of the solar wind // Geomag. Aeronomy.—1984.—24.—P. 252.

9. Duggal S. P., Pomerantz M. A. Progressive rotation of cosmic-ray diurnal variation vector // Phys. Rev. Letters.—1962.—8, N 5.—P. 215—216.
10. Fluckiger E. O. Solar and terrestrial modulation // 22nd Int. Cosmic Ray Conf., Dublin.—1991.—5.—P. 273.
11. Hashim A., Bercovitch M. A cosmic ray density gradient perpendicular to the ecliptic plane // Planet. Space Sci.—1972.—20.—P. 791.
12. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoressi G. Cosmic-ray anisotropy during high-speed streams coming from coronal holes // 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris.—1981.—10.—P. 238.
13. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoressi G. The behavior of the cosmic-ray equatorial anisotropy inside fast solar-wind streams ejected by coronal holes // Il Nuovo Cimento.—1983.—6C.—P. 145.
14. Jadhav D. K., Shrivastava M., Tiwari A. K., Shrivastava P. K. Study of semi-diurnal variation of cosmic rays during days of low and high diurnal amplitude wave trains // 18th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore.—1983.—3.—P. 337.
15. Kananan H., Komori H., Tanskanen P., Oksman J. Relation between cosmic-ray anisotropy and sector structure // 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris.—1981.—10.—P. 190.
16. Kumar S. Time variation of cosmic rays: Ph. D. Thesis. — Aligarh: Aligarh Muslim University, 1978.
17. Kumar S., Agarwal R., Mishra R., Dubey S. K. Daily variation in cosmic ray intensity on different geomagnetic conditions // Int. J. Mod. Phys. D.—2002.—11.—P. 1243.
18. Kumar S., Chauhan M. L. Unusually low amplitude anisotropic wave train events in cosmic ray intensity // Ind. J. Radio and Space Phys.—1996.—25.—P. 106.
19. Kumar S., Chauhan M. L. High amplitude anisotropic wave train events in cosmic ray intensity // Ind. J. Radio and Space Phys.—1996.—25.—P. 232.
20. Kumar S., Chauhan M. L., Dubey S. K. Effect of interplanetary turbulences causing high/low amplitude anisotropic wave trains in CR intensity // Solar Phys.—1997.—176.—P. 403.
21. Mathews T., Venkatesan D., Wilson B. G. Pronounced diurnal variation in cosmic-ray intensity // J. Geophys. Res.—1969.—74.—P. 1218.
22. Mavromichalaki H. The relation of the diurnal variation to the solar rotation and to the interplanetary sector boundaries // 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris.—1981.—10.—P. 183.
23. McCracken K. G., Rao U. R. A survey of the diurnal anisotropy // 9th Int. Cosmic Ray Conf., London.—1965.—1.—P. 213.
24. Munakata Y., Darwish A., Fujii Z., et al. High-speed solar-wind streams from coronal holes and modulation of cosmic ray diurnal anisotropy // 28th Int. Cosmic Ray Conf., Tsukuba.—2003.—P. 3925.
25. Munakata K., Mori S., Ryu J. Y., et al. // 20th Int. Cosmic Ray Conf., Moscow.—1987.—4.—P. 39.
26. Parker E. N. Theory of streaming of cosmic rays and the diurnal variation // Planet. Space Sci.—1964.—12.—P. 735.
27. Parker E. N. The magnetic field of the Galaxy // 22nd Int. Cosmic Ray Conf., Ireland.—1991.—5.—P. 35.
28. Rao U. R. Solar modulation of galactic cosmic radiation // Space Sci. Rev.—1972.—12.—P. 719.
29. Rao U. R., Ananth A. G., Agrawal S. P. Characteristics of quiet as well as enhanced diurnal anisotropy of cosmic radiation // Planet. Space Sci.—1972.—20.—P. 1799.
30. Sandstorm A. E. Cosmic ray physics. — Amsterdam: North Holland Publ. Comp., 1965.—286 p.
31. Shrivastava P. K. High speed solar wind streams and cosmic ray intensity variation // 28th Int. Cosmic Ray Conf., Tsukuba.—2003.—P. 3731.
32. Subramanian G. Amplitude of diurnal anisotropy of cosmic ray intensity // J. Geophys. Res.—1971.—76, N 4.—P. 1093—1096.
33. Subramanian G. // J. Geophys. Res.—1971.—49.—P. 34.
34. Venkatesan D., Badruddin B. Cosmic-ray intensity variations in the 3-dimensional heliosphere // Space Sci. Rev.—1990.—52.—P. 121—194.

**МІЖПЛАНЕТНІ ПЕРЕМІЩЕННЯ,
ЩО ВИКЛИКАЮТЬ НЕЗВИЧАЙНІ АНІЗОТРОПНІ
ХВИЛЬОВІ ПАКЕТИ В ІНТЕНСИВНОСТІ
КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ**

Раджеш К. Мішра, Рекха Агарвал Мішра

Розглядаються короткотривалі варіації інтенсивності космічних променів на інтервали 1991—1994 рр. Досліджено виникнення великої кількості високо- і низькоамплітудних анізотропних хвильових пакетів. Вивчено кореляцію між цими незвичайними анізотропними явищами та параметрами плазми сонячного вітру і міжпланетного магнітного поля, щоб з'ясувати можливу причину появи названих явищ. Виявилось, що момент максимуму добової варіації показує помітний систематичний зсув у бік більш ранніх годин для низькоамплітудних явищ, а для високоамплітудних явищ момент максимуму зберігає напрямок на 18 год. Важливо також відмітити, що виникнення як низько-, так і високоамплітудних анізотропних хвильових пакетів не залежить від природи полярності міжпланетного магнітного поля.

УДК 620.187:621.375.826

М. С. Чернолевський

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Критична швидкість перенесення атомів рухомою дислокацією

Надійшла до редакції 01.09.06

Запропоновано розрахунок критичної швидкості при дислокаційно-міжвузельному механізмі масопереносу у рамках моделі Френкеля—Конторової, що враховує рух у кристалі комплексу «дислокація + міжвузельний атом». Пружне поле дислокації створює для міжвузельного атома потенційну яму поблизу ядра дислокаций, що зв'язує його з рухомою дислокацією. Стійкість такого комплексу визначається як початковими швидкостями руху дислокаций атома, так і величиною взаємодії. Критична швидкість, при якій зникає ефект масопереносу в рамках запропонованого механізму, залежить від різниці початкових швидкостей дислокації і міжвузельного атома.

ВСТУП

Процеси масопереносу у кристалах, що піддаються зовнішнім імпульсним впливам з високою швидкістю деформації ($\dot{\epsilon} \geq 1 \text{ с}^{-1}$), характеризуються великою глибиною (від десятків до сотень мікрометрів) проникнення атомів з поверхні у зразок [3]. У практичному плані такі процеси можуть бути використані для модифікації приповерхневих шарів кристалів для надання їм бажаних властивостей. Прикладом таких матеріалів, які знаходять широке застосування у промисловості, зокрема у космічній галузі, є антикорозійні та термостійкі покриття, покриття, стійкі до впливу агресивних середовищ, наприклад при контакті з ракетним паливом.

При зовнішніх імпульсних діях найімовірнішими переміщувачами маси на такі великі глибини за досить короткі часи впливу ($10^{-8}\dots10^{-6} \text{ с}$) є міжвузельні атоми [5]. Однак цей тип дефектів термодинамічно нестійкий і не

може існувати самостійно досить тривалий час, що міг би бути порівнянним навіть з малими часами імпульсного впливу, а тим більше з часами протікання релаксаційних процесів у реальних кристалах [4]. Реалізація релаксаційних процесів, викликана виникненням термічних напруг [1], здійснювалася як за рахунок утворення дислокаций [2] і їхніх комплексів, так і точкових дефектів, що генеруються при взаємодії рухомих дислокаций [10]. Взаємодія фронту хвилі термічних напруг із пружним полем дислокаций може приводити до руху дислокаций від поверхні всередину кристала, їхнього накопичення і перебудови в комірчасті структури [2, 7].

Цілком природно, що пояснення цього явища потребує нового підходу до опису адекватного механізму масопереносу: атоми захоплюються рухомими дислокаціями і переносяться у глибину кристалу [12]. Це дало можливість запропонувати механізм, що дозволив описати експериментально виявлені глибини масопереносу, що

характеризують імпульсну деформацію кристала. Ключовим моментом цього механізму є стійкий рух комплексу «дислокація + міжвузельний атом» у поле механічних напруг, що поширюється від збудженої імпульсом поверхні всередину кристала. Цей механізм передбачає перенесення атомів у заданому напрямку рухомою дислокацією на глибини, обумовлені часом існування комплексу «дислокація + міжвузельний атом». Розпад такого комплексу, що просувається у глибину кристалу, можливий як при досягненні ним деякої критичної швидкості, так і внаслідок відходу міжвузельного атома на стоки, зокрема на вакансії [11].

Оцінки [11, 12, 6] показали адекватність запропонованого механізму. Тому наступним етапом, що дозволив би розглядати дислокаційно-міжвузельний механізм як найімовірніший механізм так званого [3] аномального масопереносу, є доказ стійкості стану комплексу «дислокація + міжвузельний атом». При русі дислокациї із швидкістю, більшою ніж певна критична V_c , ефект масопереносу не спостерігається. Одним з найважливіших аспектів є питання про значення V_c . У роботі [6] розглядалось питання про значення V_c для випадку однакових початкових швидкостей дислокациї і міжвузельного атома. Випадку різних початкових швидкостей присвячена дана робота.

ТЕОРІЯ І РЕЗУЛЬТАТИ

Формування рухомої дислокації відбувається під дією зовнішніх напруг. Вважаючи, що такий стан реалізувався в результаті дії зовнішнього навантаження, будемо розглядати рухому дислокацію і рухомий міжвузельний атом (МА), що спочатку знаходиться в ядрі цієї дислокації. Вважається, що зовнішні впливи визначають початкові умови, а саме — задають швидкість дислокації і МА (різні), що дозволяє не враховувати явно зовнішні впливи.

Розглянемо рух дислокації і МА в кристалі. Пружне поле дислокації діє на МА, що здобуває прискорення. У певних випадках виникає можливість зв'язаного стану і руху комплексу, що сформувався, як цілого, аж до його руйнування. Руйнування такого комплексу може відбуватися в результаті рекомбінації МА на вакансіях та

інших дефектах кристалічних граток, що є для цього стоками. Дислокація при цьому продовжує рух до зупинки на перешкодах, що властиві реальному кристалу.

Кінетика крайової дислокації досить добре описується одновимірною моделлю Френкеля—Конторової [9] (далі -- модель ФК). У нашому випадку для розрахунку динаміки МА врахуємо також вплив пружної сили рухомої дислокації. Поле деформацій при цьому для МА є зовнішнім, тому що МА є точковим об'єктом, у той час як дислокація — лінійним. Як відомо з теорії пружності, пружна сила пропорційна модулю Юнга і другій похідній від зсуву. Тому можна записати рівняння руху МА у наступному вигляді:

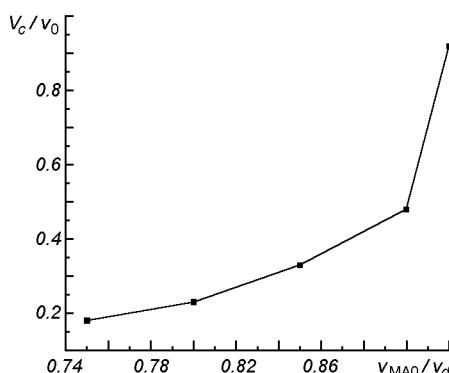
$$\ddot{x} = -\frac{\sigma}{2\pi\beta} \sin(2\pi x) + \frac{\tilde{E}}{\beta} \frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} + \frac{s}{\beta} \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2}, \quad (1)$$

$$u = 1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} [\exp(\gamma(\zeta - t))], \quad (2)$$

де x та u — відповідно зсуви міжвузельного атома та атомів ланцюжка в одиницях постійної гратки a , s — відношення коефіцієнтів пружності між МА й атомом ланцюжка, у якому розглядається рух дислокациї, і між сусідніми атомами цього ланцюжка, ζ — просторова координата атомів ланцюжка, у якому розглядається рух дислокациї, в одиницях постійної гратки, t — час в одиницях a/v_d , β — відношення квадрата швидкості дислокації v_d до квадрата швидкості звуку v_0 , $\beta = v_d^2/v_0^2$, $\sigma = 2\pi(f_0/ak)$ — відношення напруження Пайерлса f_0 до коефіцієнта k пружності матриці, $\gamma \equiv \sqrt{\sigma/(1-\beta)}$, \tilde{E} — коефіцієнт взаємодії між міжвузельним атомом і пружним полем дислокациї, пропорційний модулю Юнга.

Рівняння (2) являє собою відомий вигляд розв'язку для дислокації ФК у континуальному наближенні. Перший член у виразі (1) описує вплив на міжвузельний атом сусідніх шарів атомів, другий — пружну силу, створювану рухомою дислокацією, а останній — вплив сусідніх атомів ланцюжка, у якому розглядається рух дислокациї.

У реальних кристалах величина напруження Пайерлса змінюється в широких межах ($10^{-4}...10^{-2}ak$), тому σ визначається в межах



Критична швидкість V_c дислокації (в одиницях швидкості звуку v_0) в залежності від відношення v_{MA0}/v_d початкових швидкостей MA і дислокаций, розрахована для значень параметрів $s = 0.04$, $E = 1.0$, $\sigma = 10^{-3}$

$10^{-4} \dots 10^{-2}$. У розрахунках вважатимемо $\sigma = 10^{-3}$. Величина s звичайно менша за одиницю (сусідні атоми ланцюжка сильніше зв'язані один з одним, ніж з МА). У розрахунках вважатимемо $s = 0.04$ (слабкий зв'язок МА з атомами ланцюжка). Значення β в кристалах порядку $0.1^2 \dots 0.5^2$ (швидкість дислокації зазвичай складає десяті частки швидкості звуку [10]).

Значення розрахованої критичної швидкості дислокаций в залежності від відношення початкових швидкостей міжвузельного атома та дислокациї представлено на рисунку.

З отриманих результатів випливає, що чим більша різниця початкових швидкостей дислокациї і МА, тим при меншій швидкості дислокациї може утворитись зв'язаний стан «дислокація + МА». При порівняно низьких швидкостях дислокациї, достатніх для її взаємодії з МА, на МА діє пружне поле з боку дислокациї, він здобуває прискорення і через певний час (порядку 1 нс) утворює з дислокацією зв'язаний стан. При більшій швидкості дислокациї МА не встигає з нею провзаємодіяти, не здобуває достатнього прискорення, і комплекс «дислокация + МА» не утворюється. Залежність, наведена на рисунку, нелінійна. При несуттєвій різниці початкових швидкостей дислокациї і МА (< 0.1) утворення стійкої конфігурації можливе при швидкостях дислокациї, близьких до швидкості звуку.

ВИСНОВКИ

Отримані в роботі результати свідчать про принципову можливість здійснення переносу маси в кристалі комплексом «дислокация + МА». Реалізація цього механізму здійснюється в широкому інтервалі швидкостей дислокаций за рахунок утворення стійкого зв'язаного стану міжвузельного атома і рухомої дислокациї, при їхніх різних початкових швидкостях. Критична швидкість V_c залежить від різниці початкових швидкостей дислокациї і міжвузельного атома нелінійно. Практичне використання отриманих відомостей поширює можливість створення наукової бази, необхідної для промислового виробництва нових матеріалів методом імпульсного опромінення кристалів з властивостями термостійкості, антикорозійності, стійкості до впливу агресивних середовищ, в тому числі для потреб космічної галузі, наприклад поверхонь, які контактиують з ракетними паливами.

1. Аполлонов В. В., Барчуков А. И., Карпов Н. В. и др. Металлическое лазерное зеркало с охлаждаемой оптической поверхностью // Квантовая электроника.—1975.—2, № 2.—С. 380—385.
2. Волосевич П. Ю., Погорелов А. Е. Особенности структурных изменений в армко-железе после воздействия докритических потоков импульсного излучения ОКГ. Поверхность. Физика, химия, механика // Поверхня. Фізика, хімія, механіка.—1986.—9.—С. 126—130.
3. Герцикен Д. С., Мазанко В. Ф., Фальченко В. М. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах. — Київ: Наук. думка, 1991.—230 с.
4. Гуревич М. Е., Журавлев А. Ф., Корнишин Ю. В., Погорелов А. Е. О природе массопереноса в металлах при лазерном облучении // Металлофизика.—1985.—7, № 2.—С. 113—114.
5. Гуревич М. Е., Лариков Л. Н., Мазанко В. Ф. и др. Влияние лазерного облучения на подвижность атомов железа // ФИХОМ.—1977.—№ 2.—С. 7—9.
6. Карнаухов И. Н., Погорелов А. Е., Чернолевский М. С. Безактивационный механизм массопереноса движущимися дислокациями // Металлофизика.—2006.—28, № 6.—С. 827—835.
7. Лариков Л. Н., Максименко Е. А., Погорелов А. Е. Влияние лазерного облучения на перенос атомов в железе и алюминии // Металлофизика.—1985.—7, № 2.—С. 116—120.
8. Погорелов А. Е. Направленный перенос атомов в железе и алюминии при импульсном лазерном воздействии: Дис. ... кандидата физ.-мат. наук. — Київ: Ін-т металлофізики АН УССР, 1985.—172 с.—Машинопись.

9. Френкель Я. И., Конторова Т. О теории пластической деформации и двойственности // Журн. эксперим. и теорет. физ.—1938.—8, № 1.—С. 89—97.
10. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. — М.: Атомиздат, 1970.—599 с.
11. Pogorelov A. E., Ryaboshapka K. P., Zhuravlev A. F. Mass transfer mechanism in real crystals by pulsed laser irradiation // J. Appl. Phys.—2002.—92.—P. 5766—5771.
12. Pogorelov A., Zhuravlev A. Mass transfer by laser-generated dislocations. Defect and diffusion forum // Switzerland, Scitec Public.—2001.—194—199.—P. 1247—1252.

CRITICAL VELOCITY FOR ATOM TRANSFER BY MOVING DISLOCATION

M. S. Chernolevskii

We propose a method of the critical velocity calculation for dislocation and internode mass transfer mechanism in the framework of the Frenkel-Kontorova model which takes into account the motion in a crystal of the dislocation + internode atom complex. Elastic dislocation field forms for an internode atom the potential pit near the dislocation nucleus which relates it to the moving dislocation. The stability of the complex is determined both by initial velocities of the dislocation and atom motions and by the interaction value. The critical velocity at which the mass transfer effect disappears in the framework of the mechanism proposed depend on the difference between initial velocities of the dislocation and internode atom.

переноса в подземних водах юго-запада Русской платформы и сопредельных регионов».

Своїми багаторічними дослідженнями зробив суттєвий внесок у розвиток світової геологічної науки. Надзвичайно широкий діапазон його наукових інтересів охоплює аерокосмічні дослідження Землі, геологію, гідрогеологію, геоекологію, геотермію.

Фундаментальні дослідження, здійснені В. І. Ляльком особисто та під його керівництвом, дозволили обґрунтувати новий напрям в науках про Землю — енергомасообмін в геосистемах, який розвивається в рамках оригінальної наукової школи, що досліджує процеси енергомасообміну в геосистемах та їхній вплив на фізико-хімічні і біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів та є дуже чутливими до дії різних природних та антропогенних факторів. На базі спектральних моделей розробляються нові методи і технології тематичного оброблення даних ДЗЗ.

В. І. Лялько успішно вирішив ряд фундаментальних питань, пов'язаних з теоретико-методичним обґрунтуванням і практичним випробуванням у виробничих умовах нових методів в аерокосмічному землезнавстві (радарна інтерферометрія, гіперспектрометрія та ін.). Це сприяло розв'язанню актуальних природоресурсних і природоохоронних задач (аерокосмічних пошуків нафтогазових покладів, контроль і прогнозування врожайності сільськогосподарських культур, пожежонебезпечності лісів, підтоплення територій, паводків, екологічного стану територій і акваторій, оцінка опускання земної поверхні в районах закриття вугільних шахт та ін.).

В особі В. І. Лялька органічно поєднані кращі якості вченого і організатора науки, який ефективно впроваджує свої розробки у виробництво. Ним опубліковано понад 400 праць, серед яких 20 монографій, підготовлено багато кандидатів та докторів наук.

В. І. Лялько веде велику організаційну та педагогічну роботу, є головою Наукової ради НАН України з вивчення природних ресурсів дистанційними методами та Секції дистанційного зондування Землі НТР Національного космічного

агентства України, головою спеціалізованої вченої ради при ЦАКДЗ ІГН НАН України із захисту докторських та кандидатських дисертацій зі спеціальністю «аерокосмічні дистанційні дослідження», є членом Наукових рад НАН України та РАН з проблем біосфери, космічних та системних дослідень, екології, геотермії, він є заступником редактора «Геологічного журналу» та журналу «Геоінформатика», членом редколегії журналу «Космічна наука і технологія», науковим керівником проекту дослідження природних ресурсів аерокосмічними засобами у межах Національної космічної програми України. Він є координатором Відділення наук про Землю НАН України у проекті від України («GMES-GEOSS-Україна») до Міжнародної програми «Глобальна система систем обстеження Землі» (GEOSS) та Європейської програми «Глобальний моніторинг для навколошнього середовища та безпеки» (GMES), в якому беруть участь установи Відділення наук про Землю НАН України у співдружності з іншими Відділеннями НАН України та з установами НКАУ і зарубіжними співвиконавцями. В. І. Лялько бере активну участь у міжнародній науковій діяльності, про що свідчать його неодноразові виступи на міжнародних наукових форумах, публікації в зарубіжних наукових виданнях та виграні гранти Міжнародного наукового фонду та космічних агентств Німеччини, Франції, Європи та ін.

Деякі публікації ювіляра

1. Calculation of Heat and Mass Transfer in the Earth's Crust (Algorithms and Programs). — New York — New Delhi, Amering Publ. Co, 1981.—150 p.—(Publish. US Depart. of Interior and the National Science Found. Washington, D. C.).
2. Геологія шельфу України. Тверді корисні копалини. — Київ: Наук. думка, 1983.—170 с. (Соавторы — Шнюков Е. Ф., Иноземцев Ю. И., Подорван В. Н. и др.).
3. Космическая информация в геологии. — М.: Наука, 1985.—560 с. (Соавторы — Митник М. М., Вульфсон Л. Д., Трифонов В. Г. и др.).

4. Тепломассоперенос в литосфере. — Київ: Наук. думка, 1985.—260 с.
5. Аерокосмічні методи у геоекології. — Київ: Наук. думка, 1992.—206 с. (Співавтори — Вульфсон Л. Д., Жарий В. Ю. та ін.).
6. Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ-Карбон, 1999.—263 с. (Співавтори — Федоровський О. Д., Перерва В. М., Костюченко Ю. В. та ін.).
7. Термогеодинамическая модель эволюции астенолитов // Геофиз. журн.—1993.—13, № 4.—С. 3—12. (Соавторы — Чекунов А. В., Кутас Р. И., Митник М. М.).
8. Україна з космосу (Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів) // Космічна наука і технологія. Додаток.—1-е вид.—1997.—3, № 3/4.—34 с.; — 2-е вид.—Київ, 1999.—36 с. (Співавтори — Федоровський О. Д., Рябоконенко О. Д., Сахацький О. І. та ін.).
9. Космос — Україні (Атлас комп’ютерно дешифрованих космознімків) (Ред. та співавтори — Федоровський О. Д. та ін.). — Київ: НАНУ—НКАУ, 2001.—109 с.
10. Аерокосмічні дослідження Землі: тенденції і перспективи (Редактор и співавтор) // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—206 с.
11. Інформатизація аерокосмічного землезнавства. — Київ: Наук. думка (Редактор та співавтор — С. А. Довгий).
12. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. — Киев: Наук. думка, 1988.—2001.—Т. I—IV (Соавторы — Шестопалов В. М. и др.).
13. Словник із дистанційного зондування Землі (Редактор та співавтор — М. О. Попов). — Київ.: СМП «АВЕРС», 2004.—170 с.
14. Державний стандарт ДСТУ 4220-2003 «Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять». — Київ: Держспоживстандарт України, 2003.—18 с.
15. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування (Редактор та співавтор М. О. Попов та ін.). — Київ: Наук. думка, 2006.—356 с.

У рік свого 75-річчя та 50-річчя наукової діяльності ювіляр, як завжди, багато і плідно працює, перетворюючи у реальні практичні досягнення ті наукові напрацювання, яким він присвятив своє життя. Усім, кому доводилося спілкуватися з ученим, відома його цілеспрямованість, ерудованість, вміння проводити дослідження на сучасному науковому рівні і доводити їх до практичних результатів. Широкий кругозір, почуття гумору, принциповість, реальна допомога тим, хто її потребує, — ось риси, притаманні ювілярові.

НАШІ АВТОРИ

АГАПОВ Володимир Михайлович — науковий співробітник Інституту прикладної математики ім. М. В. Келдиша Російської академії наук, відповідальний секретар Експертної групи з «космічного сміття» при Раді з космосу РАН.

Напрям науки — еволюція космічних об'єктів штучного походження в навколоземному просторі, аналіз космічної діяльності і засміченості навколоземного простору.

БАРАБАНОВ Сергій Іванович — старший науковий співробітник Інституту астрономії Російської академії наук (Москва), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — малі тіла Сонячної системи, астероїдно-кометна небезпека.

БІРЮКОВ Вадим Володимирович — науковий співробітник Кримської лабораторії Державного астрономічного інституту ім. П. К. Штернберга Московського державного університету, с. Наукове, Україна.

Напрям науки — обробка зображень, спостереження об'єктів навколоземного простору.

БУШУЄВ Євген Іванович — заступник директора Державного підприємства

«Дніпрокосмос», кандидат технічних наук.

Напрям науки — системне проектування космічних систем спостереження та обробка даних дистанційного зондування Землі.

ВЛАСЮК Валерій Валентинович — заступник директора Спеціальної астрофізичної обсерваторії Російської академії наук, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — позагалактична астрономія, змінність активних ядер галактик і радіоджерел, розробка програмного забезпечення.

ВОЗНЮК Тамара Миколаївна — провідний інженер Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — космічна мікробіологія.

ВОЛОШИН В'ячеслав Іванович — директор Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук.

Напрям науки — розробка апаратно-программних засобів для планування роботи і оперативного керування космічною системою, обробка даних дистанційного зондування Землі.

ВОЛЬВАЧ Олександр Євгенович — заступник директора Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук, лауреат премії Національної академії наук України ім. Є. П. Федорова.

Напрям науки — позагалактична радіоастрономія, РНДБ.

ГОДУНОВА Віра Георгіївна — науковий співробітник Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України.

Напрям науки — моніторинг змін хімічного складу атмосфери.

ГОКОВ Олександр Михайлович — старший науковий співробітник кафедри космічної

радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіофізичні дослідження нижньої іоносфери, фізика атмосфери і нижньої іоносфери, космічна погода.

ДЕМКІВ Орест Теодорович — завідувач відділу екоморфогенезу рослин Інституту екології Карпат Національної академії наук України, професор, доктор біологічних наук; соросівський професор.

Напрям науки — фізіологія рослин.

ДЕМЧЕНКО Анатолій Вадимович — науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і НКАУ).

Напрям науки — проектування та конструкції літальних апаратів.

ЗАЄЦЬ Ірина Євгенівна — аспірант Київського національного університету ім. Тараса Шевченка.

Напрям науки — біохімія.

ЗАПЄВАЛОВ Олександр Сергійович — старший науковий співробітник Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — аерокосмічні дистанційні методи, геоінформаційні системи.

ЗЄВАКО Василь Сергійович — заступник Генерального директора Національного центру аерокосмічної освіти молоді України (НЦАОМУ), доцент, кандидат технічних наук.

Напрям науки — технологія виробництва літальних апаратів.

ІБРАГІМОВ М. А. — Астрономічний інститут ім. Улугбека Національної академії наук Республіки Узбекистан, Ташкент.

КАРПОВ Микола Володимирович — завідувач лабораторії автоматизації та систем управління Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, лауреат Державної премії України 2003р. у галузі науки і техніки, кандидат технічних наук.

Напрям науки — обчислювальна техніка та інформаційні технології.

КІЛАДЗЕ Ролан Ілліч — науковий консультант Національної астрофізичної обсерваторії Грузії, член-кореспондент Академії наук Грузії.

Напрям науки — планетна космогонія, еволюція штучних космічних об'єктів на геостаціонарній орбіті.

КОВАЛЬЧУК Марія Вікторівна — науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — космічна мікробіологія.

КОЗИРОВСЬКА Наталія Олексіївна — старший науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

КОНОВАЛЕНКО Олександр Олександрович — завідувач відділу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, академік Національної академії наук України, заслужений діяч науки і техніки України. Лауреат Державної премії СРСР.

Напрям науки — радіоастрономія.

КОРДЮМ Єлизавета Львівна — завідувач відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки

ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, професор.

Напрям науки — клітинна біологія, ембріологія рослин, космічна біологія.

КОРЧИНСЬКИЙ Володимир Михайлович — завідувач кафедри електронних засобів телекомунікацій, професор Дніпропетровського національного університету, доктор технічних наук.

Напрям науки — автоматизоване оброблення та розпізнавання зображень, цифрові системи телекомунікацій.

КУЛАБУХОВ Анатолій Михайлович — доцент Дніпропетровського національного університету (ДНУ), кандидат технічних наук.

Напрям науки — системи управління літальними апаратами.

ЛУКАШОВ Дмитро Володимирович — доцент Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біохімія.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, лауреат Державної премії України.

Напрям науки — гідро-геологія, дистанційне зондування земної поверхні.

ЛЯШЕНКО Михайло Володимирович — молодший науковий співробітник Інституту юносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — сонячно-земна фізика, геофізика, іоносферне моделювання.

МАЙДАНЮК Дмитро Вікторович — старший викладач Дніпропетровського

національного університету (ДНУ).

Напрям науки — проектування та конструкції літальних апаратів.

МАНОЙЛЕНКО Олександр Олексійович — доцент Дніпропетровського національного університету (ДНУ), кандидат технічних наук.

Напрям науки — динаміка, балістика та керування літальними апаратами.

МАРШАЛКІНА А. Л. — Астрономічний інститут ім. Улугбека Національної академії наук Республіки Узбекистан, Ташкент.

МАШКОВСЬКА Світлана Петрівна — старший науковий співробітник Ботанічного саду Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — ботаніка.

МИТРОХІН Олександр Володимирович — доцент Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — геологія.

МІШРА Раджеш К. — Інститут досліджень тропічних лісів, Джабалпур, Індія.

МІШРА Реха Агарвал — Урядовий автономний коледж наукового моделювання, Джабалпур, Індія.

МОЛОТОВ Ігор Євгенович — завідувач сектору інформаційних засобів системи контролю Інституту прикладної математики ім. М. В. Келдиша Російської академії наук, ОАО МАК «Вимпел».

Напрям науки — РНДБ, радіолокація, засміченість навколоземного простору.

ПАРШИНА Ольга Іванівна — головний програміст Державного підприємства «Дніпрокосмос»

Напрям науки — системне проектування космічних систем спостереження та обробка даних дистанційного зондування Землі.

ПОКАЗЄВ Костянтин Васильович — професор Московського державного університету ім. М. В. Ломоносова, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — аерокосмічні дистанційні методи, геоінформаційні системи.

ПУЛЯЄВ Валерій Олександрович — старший науковий співробітник, завідувач відділу Інституту юносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, кандидат технічних наук.

Напрям науки: інформаційні технології, отримання параметрів юносферної плазми.

ПУСТОВОЙТЕНКО Володимир Володимирович — провідний науковий співробітник Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — аерокосмічні дистанційні методи, геоінформаційні системи.

РОГУЦЬКИЙ Іван Станіславович — науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук України,

Напрям науки — фізика твердого тіла.

РУМЯНЦЕВ Василь Володимирович — старший науковий співробітник лабораторії експериментальної астрофізики НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія».

Напрям науки — спостереження малих тіл сонячної системи та космічного сміття, обробка зображень.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геолого-мінералогічних наук, лауреат Державної премії України в області науки і техніки.

Напрям науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

СЕРГЄЕВ Олександр Васильович — заступник директора з наукової роботи, завідувач відділу Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, лауреат Державної премії України у галузі науки і техніки, кандидат технічних наук.

Напрям науки — спостережна астрономія, розробка та впровадження приладів і методів астрономічних досліджень.

СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна — молодший

науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — математичне моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах та методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

СОСОНКІН Михайло Григорович — завідувач лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — системи, прилади і методи дослідження атмосфери.

СОЧИЛІНА Алла Семенівна — старший науковий співробітник Головної (Пулковської) астрономічної обсерваторії Російської академії наук.

Напрям науки — небесна механіка.

СТРЕПКА Іван Дмитрович — інженер I категорії лабораторії радіоастрономії НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія».

Напрям науки — радіоелектроніка.

ТАРАДІЙ Володимир Кирилович — директор Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України у галузі науки і техніки, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічна геодинаміка.

ТИРНОВ Олег Федорович — декан радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри космічної радіофізики, доцент, кандидат фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — збурення, моделювання та передбачення процесів у іоносфері, медико-біологічні аспекти сонячних та магнітних збурень у навколошньому середовищі.

ТИТЕНКО Володимир Вікторович — науковий співробітник Головної (Пулковської) астрономічної обсерваторії Російської академії наук.

Напрям науки — балістичне забезпечення спостережень ШСЗ та космічного сміття.

ТУККАРІ Джино — Інститут радіоастрономії Італії, заступник голови технічної групи Європейської РНДБ-мережі.

Напрям науки — РНДБ.

ФОЇНГ Бернард Г. — головний науковець Європейського космічного агентства, виконавчий директор міжнародної робочої групи з дослідження Місяця (Нідерланди, Нордвік), доктор філософії.

Напрям науки — космічна техніка.

ХОРКАВЦІВ Ярослава Дмитрівна — старший науковий співробітник Інституту екології Карпат Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — цитологія.

ХУТОРНИЙ Віктор Васильович — Генеральний директор Національного центру аерокосмічної освіти молоді України (НЦАОМУ).

Напрям науки — технологія виробництва літальних апаратів.

ЧЕРНОЛЕВСЬКИЙ Максим Сергійович — аспірант Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізика твердого тіла.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доктор фіз.-мат. наук, лауреат Державної премії УРСР в області науки і техніки.

Напрям науки: космічна радіофізика, фізика і екологія геокосмосу, космічна погода.

ШИЛЬДКНЕХТ Томас — керівник групи оптичної астрометрії Астрономічного інституту Бернського університету (Швейцарія), доктор наук.

Напрям науки — оптичні спостереження космічного сміття.

ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — математичне моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах, методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

ЮРИШЕВА О. В. — Інститут сонячно-земної фізики Сибірського відділення Російської академії наук, Іркутськ.

АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК ДО ТОМУ 12 ЗА 2006 Р.

Абурджания Г. Д., Ломинадзе Д. Г., Хантадзе А. Г., Харшиладзе О. А. Новый механизм усиления и взаимной трансформации волн в ионосфере с неоднородным зональным ветром // 2006.—12, № 1.—С. 29—48.

Агапов В. М. — див. Вольвач А. Е.

Алексеев Ю. С., Кукушкин В. И., Левенко А. С. Перспектива ракетно-космической отрасли Украины — космическая система на базе воздушно-космического самолета // 2006.—12, № 4.—С. 3—13.

Алексенко Е. Н. — див. Похил Ю. А.

Алексенко Е. Н. — див. Похил Ю. А.

Аллатов А. П., Бушуев Е. І., Пилипенко О. В., Хорольський П. П., Цимбал В. М. Де шукати Україні місце на світовому ринку супутникового спостереження Землі // 2006.—12, № 1.—С. 94—98.

Аллатов А. П., Зевако В. С., Пилипенко О. В., Хорольський П. П., Хуторний В. В. Формування науково-освітньої програми участі молоді України у космічних дослідженнях // 2006.—12, № 4.—С. 104—108.

Андреева О. А. — див. Зельк Я. И.

Арсентьев И. Н. — див. Сорокин А. Ф.

Барабанов С. И. — див. Тарадий В. К.

Басс В. П. Численные и экспериментальные исследования в динамике разреженного газа и их приложения в ракетно-космической технике // 2006.—12, № 1.—С. 12—17.

Бахмутов В. Г., Седова Ф. И., Мозговая Т. А. Среднеширотное проявление полярной суббури и реализация сейсмической энергии в зоне Вранча // 2006.—12, № 1.—С. 57—63.

Белов Д. Г. Электроэнергетическое обеспечение живучести космического аппарата при нарушении ориентации солнечной батареи // 2006.—12, № 4.—С. 20—23.

Беляев С. М., Корепанов В. Е., Єфименко М. В. Політні випробування магнітної системи на вігації мікросупутника // 2006.—12, № 4.—С. 14—19.

Бирюков В. В. — див. Вольвач А. Е.

Боднар Е. Н. — див. Федоровский А. Д.

Борисова Т. А., Крысанова Н. В., Гиммельрейх Н. Г. Влияние DL-трео-бензилоксиас-

партата (DL-TBOA) на освобождение глутамата из синаптосом в среде с низким содержанием внеклеточного Na^+ в норме и в условиях моделированной гравитации // 2006.—12, № 1.—С. 90—93.

Бушуев Е. И. — див. Волошин В. И.

Бушуев Е. И. — див. Волошин В. И.

Бушуев Е. И. — див. Аллатов А. П.

Ван С. — див. Похил Ю. А.

Вариченко Л. В., Колобродов В. Г., Ладыка Я. Е., Микитенко В. И., Михеенко Л. А. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли // 2006.—12, № 2/3.—С. 59—69.

Ватерман Ю. — див. Самсонов С. Н.

Власенко В. П. — див. Набатов А. С.

Власенко В. П. — див. Сорокин А. Ф.

Власюк В. В. — див. Вольвач А. Е.

Волошин В. И., Бушуев Е. И., Левенко А. С., Шапарь А. Г., Емец Н. А., Тяпкин О. К. От оценки состояния природной среды методами дистанционного зондирования Земли к обеспечению устойчивого развития общества // 2006.—12, № 2/3.—С. 70—78.

Вольвач А. Е., Бушуев Е. И., Паршина О. И. Разработка методики классификации покровных элементов ландшафта // 2006.—12, № 5/6.—С. 18—22.

Волошин В. И., Корчинский В. М. Повышение информационности видовых данных дистанционного зондирования Земли // 2006.—12, № 5/6.—С. 15—17.

Вольвач А. Е., Румянцев В. В., Молотов И. Е., Сочилина А. С., Титенко В. В., Агапов В. М., Киладзе Р. И., Шильдкнехт Т., Бирюков В. В., Ибрагимов М. А., Маршалкина А. Л., Власюк В. В., Юрьшева О. В., Стрепка И. Д., Коноваленко А. А., Туккари Дж. Исследования фрагментов космического мусора в геостационарной области // 2006.—12, № 5/6.—С. 50—57.

Гаврилов Р. В. — див. Похил Ю. А.

Гаврилов Р. В. — див. Похил Ю. А.

Гиммельрейх Н. Г. — див. Борисова Т. А.

- Годунова В. Г.* — див. Тарадий В. К.
- Гоков А. М., Тырнов О. Ф.* Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период магнитной бури 7–11 ноября 2004 г., обусловленные утренним солнечным терминатором // 2006.—12, № 5/6.—С. 69—78.
- Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В.* Метод измерения лучистой составляющей теплового потока на поверхности керамической теплозащиты // 2006.—12, № 2/3.—С. 98—102.
- Грицай А. В., Євтушевський О. М.* Сезонні зміни активності квазістанціонарних планетарних хвиль у стратосфері над Антарктикою // 2006.—12, № 4.—С. 71—77.
- Демків О. Т., Кордюм Е. Л., Хоркавців Я. Д., Таїрбеков М. Г.* Умови мікрогравітації — експериментальна база для пізнання закономірностей морфогенезу рослин в гравітаційному полі // 2006.—12, № 5/6.—С. 30—35.
- Демченко А. В., Зевако В. С., Кулабухов А. М., Майданюк Д. В., Манойленко А. А., Хуторний В. В.* Первый украинский молодежный спутник // 2006.—12, № 5/6.—С. 4—9.
- Емец Н. А.* — див. Волошин В. И.
- Євтушевський О. М.* — див. Грицай А. В.
- Емець В. В.* Експеримент з моделлю ракетного двигуна на газоподібному поліетиленовому пальниковому // 2006.—12, № 2/3.—С. 103—107.
- Єфименко М. В.* — див. Беляєв С. М.
- Залужный Р. Н.* — див. Набатов А. С.
- Залужный Р. Н.* — див. Сорокин А. Ф.
- Запевалов А. С., Показеев К. В., Пустовойтенко В. В.* О соотношении зеркальной и брегговской составляющих при рассеянии радиоволн квазигауссовой морской поверхностью // 2006.—12, № 5/6.—С. 23—29.
- Захарова М. Я.* — див. Сорокин А. Ф.
- Зевако В. С.* — див. Алпатов А. П.
- Зевако В. С.* — див. Демченко А. В.
- Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А.* О методах оценивания вращения солнечных структур по наблюдениям Солнца в линии Не I λ 1083 нм // 2006.—12, № 1.—С. 85—89.
- Зімчук І. В., Іщенко В. І.* Алгоритм цифрової корекції орбітального гірокомпаса космічного апарату // 2006.—12, № 2/3.—С. 12—15.
- Златкін Ю. М., Ржемовський В. П., Кузнеццов Ю. О.* Особливості керування Міжнародною космічною станцією «Альфа» на початковому етапі польоту // 2006.—12, № 2/3.—С. 3—7.
- Ибрагимов М. А.* — див. Вольвач А. Е.
- Іщенко В. І.* — див. Зімчук І. В.
- Карпов Н. В.* — див. Тарадий В. К.
- Киладзе Р. И.* — див. Вольвач А. Е.
- Козлов З. В.* — див. Федоровский А. Д.
- Колобродов В. Г.* — див. Вариченко Л. В.
- Коноваленко А. А.* — див. Вольвач А. Е.
- Кордюм Е. Л.* — див. Демків О. Т.
- Корепанов В. Є.* — див. Беляєв С. М.
- Корчинский В. М.* — див. Волошин В. И.
- Костенко Г. А.* — див. Шатіхін В. Є.
- Кривдик В. Г.* Динаміка частинок та їхнє нетеплове випромінювання у неоднорідній магнітосфері із змінним дипольним магнітним полем // 2006.—12, № 4.—С. 78—85.
- Крысанова Н. В.* — див. Борисова Т. А.
- Кузнеццов Ю. О.* — див. Златкін Ю. М.
- Кузьков В. П., Недашковский В. Н., Савенков С. Н., Кузьков С. В.* Исследование поляризации лазерного передающего модуля для коммуникационных экспериментов с геостационарным спутником ARTEMIS ESA // 2006.—12, № 1.—С. 23—28.
- Кузьков С. В.* — див. Кузьков В. П.
- Кукушкин В. И.* — див. Алексеев Ю. С.
- Кулабухов А. М.* — див. Демченко А. В.
- Ладыка Я. Е.* — див. Вариченко Л. В.
- Левенко А. С.* — див. Алексеев Ю. С.
- Левенко А. С.* — див. Волошин В. И.
- Левин А. Я.* — див. Похил Ю. А.
- Ломинадзе Д. Г.* — див. Абурджания Г. Д.
- Лотоцкая В. А.* — див. Похил Ю. А.
- Лотоцкая В. А.* — див. Похил Ю. А.
- Лялько В. І., Шпортьюк З. М., Сахацький О. І., Сибирцева О. М.* Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільногого індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // 2006.—12, № 5/6.—С. 10—14.
- Ляшенко М. В., Пуляев В. А., Черногор Л. Ф.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности // 2006.—12, № 5/6.—

- С. 58—68.
- Ляшенко М. В., Скляров И. Б., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период спада солнечной активности // 2006.—12, № 2/3.—С. 45—58.
- Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности // 2006.—12, № 4.—С. 56—70.
- Майданюк Д. В.* — див. Демченко А. В.
- Максименко О. И., Яременко Л. Н., Шендеровская О. Я., Мельник Г. В., Мозговая Т. А.* Модели геомагнитного поля и характеристики магнитных бурь // 2006.—12, № 1.—С. 64—69.
- Манойленко А. А.* — див. Демченко А. В.
- Маршалкина А. Л.* — див. Вольвач А. Е.
- Мельник В. М.* Коливання і хвилі поліагрегатного підвісу гіроскопа // 2006.—12, № 4.—С. 38—44.
- Мельник Г. В.* — див. Максименко О. И.
- Мельник Г. В.* — див. Яременко Л. Н.
- Микитенко В. И.* — див. Вариченко Л. В.
- Михеенка Л. А.* — див. Вариченко Л. В.
- Мозговая Т. А.* — див. Бахмутов В. Г.
- Мозговая Т. А.* — див. Максименко О. И.
- Молотов И. Е.* — див. Вольвач А. Е.
- Мухаммад Рашик Улла Бейг Мирза* — див. Парняков Е. С.
- Набатов А. С., Петренко А. Г., Цюх А. М., Нестерук В. Н., Пронцузов В. Н., Власенко В. П., Залужный Р. Н., Пискун О. Н.* Изменения погрешностей наведения антенны радиотелескопа РТ-70 с помощью источников естественного радиоизлучения // 2006.—12, № 4.—С. 52—55.
- Недашковский В. Н.* — див. Кузьков В. П.
- Нестерук В. Н.* — див. Набатов А. С.
- Нестерук В. Н.* — див. Сорокин А. Ф.
- Новиков А. В., Яценко В. А.* Новый подход к проблеме стохастической оптимизации линейных динамических систем с параметрическими неопределенностями // 2006.—12, № 2/3.—С. 83—97.
- Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф.* Динамические процессы в среднеширотной мезосфере // 2006.—12, № 2/3.—С. 37—44.
- Парновский А. С., Черемных О. К.* Спектр баллонных возмущений с произвольной поляризацией во внутренней магнитосфере Земли // 2006.—12, № 1.—С. 49—56.
- Парняков Е. С., Мухаммад Рашик Улла Бейг Мирза* Проблемы использования волоконно-оптических элементов в оптико-электронных изображающих приборах космических информационных систем // 2006.—12, № 4.—С. 45—51.
- Паршина О. И.* — див. Волошин В. И.
- Пасичный В. В.* — див. Горностаев Г. Ф.
- Петренко А. Г.* — див. Набатов А. С.
- Петров Ю. В., Рассамакин Б. М., Таранова Т. А., Хорошилов В. С.* Оценка влияния на тепловой режим КА отклонений от nominalных значений теплофизических параметров // 2006.—12, № 1.—С. 18—22.
- Пилипенко О. В.* — див. Алпатов А. П.
- Пилипенко О. В.* — див. Алпатов А. П.
- Пискун О. Н.* — див. Набатов А. С.
- Плотников И. Я.* — див. Самсонов С. Н.
- Показеев К. В.* — див. Запевалов А. С.
- Попель В. М.* — див. Шатіхін В. Є.
- Похил Ю. А., Гаврилов Р. В., Яковенко Л. Ф., Алексенко Е. Н., Чернецкий В. К., Левин А. Я., Лотоцкая В. А.* Научная аппаратура и материалы для реализации космического эксперимента «Пента—Усталость» // 2006.—12, № 1.—С. 3—11.
- Похил Ю. А., Гаврилов Р. В., Яковенко Л. Ф., Алексенко Е. Н., Лотоцкая В. А., Ван С., Хе Ш., Тарасов Г. В., Рассамакин Б. М.* Механические характеристики основных элементов конструкций солнечных батарей // 2006.—12, № 4.—С. 24—32.
- Пронцузов В. Н.* — див. Набатов А. С.
- Пуляев В. А.* — див. Ляшенко М. В.
- Пустовойтенко В. В.* — див. Запевалов А. С.
- Рассамакин Б. М.* — див. Петров Ю. В.
- Рассамакин Б. М.* — див. Похил Ю. А.
- Ржемовський В. П.* — див. Златкін Ю. М.
- Розуменко В. Т.* — див. Панасенко С. В.
- Румянцев В. В.* — див. Вольвач А. Е.
- Саблина В. И., Стефанишин Я. И., Стрижак Ю. И.* Нормативное обеспечение дистанционного зондирования Земли // 2006.—12, № 4.—С. 98—103.
- Савенков С. Н.* — див. Кузьков В. П.
- Сайбек Д. Г.* — див. Самсонов С. Н.
- Самсонов С. Н., Плотников И. Я., Сайбек Д. Г.,*

- Ватерман Ю.* Связь параметров солнечного ветра с высокоширотными магнитными пульсациями // 2006.—12, № 1.—С. 80—84.
- Сахацький О. І.* — див. Лялько В. І.
Седова Ф. І. — див. Бахмутов В. Г.
Семенов Л. П. — див. Шатіхін В. Є.
Сергеев А. В. — див. Тарадий В. К.
Сибірцева О. М. — див. Лялько В. І.
Скляров И. Б. — див. Ляшенко М. В.
Сорокин А. А. — див. Сорокин А. Ф.
Сорокин А. Ф., Цюх А. М., Нестерук В. Н., Власенко В. П., Залужный Р. Н., Сорокин А. А., Захарова М. Я., Арсентьев И. Н., Тараков И. С. Научно-технологический модуль инжекции плазмы для микроспутника // 2006.—12, № 2/3.—С. 8—11.
- Сосонкин М. Г.* — див. Тарадий В. К.
Сочилина А. С. — див. Вольвач А. Е.
Станкевич С. А. Імовірнісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних знімків // 2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
- Степанян Н. Н.* — див. Зельк Я. І.
Стефанишин Я. И. — див. Саблина В. И.
Стрепка И. Д. — див. Вольвач А. Е.
Стрижак Ю. И. — див. Саблина В. И.
Сумарук П. В., Сумарук Т. П. Розділення геомагнітних варіацій в середніх широтах від іоносферних та магнітосферних джерел // 2006.—12, № 1.—С. 76—79.
- Сумарук Т. П.* — див. Сумарук П. В.
- Таїrbеков М. Г.* — див. Демків О. Т.
Тарадий В. К., Годунова В. Г., Карпов Н. В., Сергеев А. В., Сосонкин М. Г., Барабанов С. И. Контроль потенциально опасных объектов и техногенного загрязнения атмосферы и ближнего космоса на обсерватории Терскол // 2006.—12, № 5/6.—С. 42—49.
- Таранова Т. А.* — див. Петров Ю. В.
Тарасов Г. В. — див. Похил Ю. А.
Тарасов И. С. — див. Сорокин А. Ф.
Титенко В. В. — див. Вольвач А. Е.
Ткаченко Г. В. — див. Горностаев Г. Ф.
Туккари Дж. — див. Вольвач А. Е.
Тырнов О. Ф. — див. Гоков А. М.
Тырнов О. Ф. — див. Панасенко С. В.
Тяпкин О. К. — див. Волошин В. И.
- Федоровский А. Д., Боднар Е. Н., Козлов З. В.* Системная методология развития космического геоэкологического мониторинга // 2006.—12, № 4.—С. 86—97.
- Хантадзе А. Г.* — див. Абурджания Г. Д.
Харшиладзе О. А. — див. Абурджания Г. Д.
Хе Ш. — див. Похил Ю. А.
Хоркавців Я. Д. — див. Демків О. Т.
Хорольський П. П. — див. Алпатов А. П.
Хорольський П. П. — див. Алпатов А. П.
Хорошилов В. С. — див. Петров Ю. В.
Хорошилов В. С. — див. Шатіхін В. Є.
Хуторний В. В. — див. Алпатов А. П.
Хуторний В. В. — див. Демченко А. В.
- Цимбал В. М.* — див. Алпатов А. П.
Цюх А. М. — див. Набатов А. С.
Цюх А. М. — див. Сорокин А. Ф.
- Черемных О. К.* — див. Парновский А. С.
Чернецкий В. К. — див. Похил Ю. А.
Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера // 2006.—12, № 2/3.—С. 16—36.
- Черногор Л. Ф.* — див. Ляшенко М. В.
Черногор Л. Ф. — див. Ляшенко М. В.
Черногор Л. Ф. — див. Панасенко С. В.
Черногор Л. Ф. — див. Ляшенко М. В.
Чернолевський М. С. Критична швидкість перенесення атомів рухомою дислокацією // 2006.—12, № 5/6.—С. 87—90.
- Черняк Ю. В.* — див. Ляшенко М. В.
Черняк Ю. В. — див. Ляшенко М. В.
- Шапарь А. Г.* — див. Волошин В. И.
Шатіхін В. Є., Семенов Л. П., Хорошилов В. С., Попель В. М., Костенко Г. А. Врахування зносу зубчатих передач при оцінюванні динамічних характеристик приводу сонячних батарей // 2006.—12, № 4.—С. 33—37.
- Шендеровская О. Я.* — див. Максименко О. И.
Шендеровская О. Я. — див. Яременко Л. Н.
Шильдкнехт Т. — див. Вольвач А. Е.
Шпортиюк З. М. — див. Лялько В. І.
- Юрышева О. В.* — див. Вольвач А. Е.
- Яковенко Л. Ф.* — див. Похил Ю. А.
Яковенко Л. Ф. — див. Похил Ю. А.
Яременко Л. Н., Мельник Г. В., Шендеровская О. Я. О течении магнитосферных и индуцированных токов во время магнитных бурь // 2006.—12, № 1.—С. 70—75.

Яременко Л. Н. — див. Максименко О. И.
Яценко В. А. — див. Новиков А. В.

Foing B. — see Zaets I.

Kovalchuk M. — see Zaets I.
Kozyrovska N. — see Zaets I.

Lukashov D. — see Zaets I.

Mashkovska S. — see Zaets I.

Mishra Rajesh K., Mishra Rekha Agarwal
Interplanetary transients causing unusual
anisotropic wave trains in CR intensity //

2006.—12, № 5/6.—С. 79—86.
Mishra Rekha Agarwal — see Mishra Rajesh K.
Mytrokhyn O. — see Zaets I.

Rogutskyy I. — see Zaets I.

Voznyuk T. — see Zaets I.

Zaets I., Voznyuk T., Kovalchuk M., Rogutskyy I.,
Lukashov D., Mytrokhyn O., Mashkovska S.,
Foing B., Kozyrovska N. Optimization of plant
mineral nutrition under growth-limiting condi-
tions in a lunar greenhouse // 2006.—12,
№ 5/6.—С. 36—41.

ХРОНІКА

Літня школа-семінар «Космічні дослідження тіл
Сонячної системи: результати і перспекти-
ви» // 2006.—12, № 4.—С. 113—116.

Член-кореспондент НАН України Вадим Іва-
нович Лялько (до 75-річного ювілею) //
2006.—12, № 5/6.—С. 91—93.

Авторський покажчик // 2006.—12, № 5/6.—
С. 99—103.

Новини космічних агентств світу. Глобальна

стратегія дослідження Місяця // 2006.—12,
№ 5/6.—С. 104—107.

Новини космічних агентств світу. Проект «Коро-
нас—Фотон» — новий російський апарат
для спостережень Сонця (За матеріалами
журналу «Новости космонавтики», № 7,
2006) // 2006.—12, № 5/6.—С. 108.

Робоча нарада «Діяльність української ЛЛС-ме-
режі» // 2006.—12, № 5/6.—С. 109.

НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ

Глобальна стратегія дослідження Місяця

14 січня 2004 р. президент США Джордж Буш-молодший виступив в штаб-квартирі НАСА з новою ініціативою з освоєння космічного простору, орієнтованою на відновлення пілотованих польотів на Місяць та його активне освоєння, а також організацію експедицій на Марс та інші планети Сонячної системи. Ця ініціатива викликала широкий резонанс у світі. Створення населеної бази на Місяці, у тому числі і як стартової платформи для

польотів до інших світів, стало першочерговим завданням цієї програми.

На початку 2006 р. один з керівних органів НАСА (Exploration Systems Mission Directorate) ініціював створення глобальної дослідницької стратегії, орієнтованої перш за все на дослідження Місяця. Основна мета цієї стратегії — дати відповідь на два ключових питання: «Чому ми повинні повернутись до Місяця?» і «Що ми зби-

Table 1. Lunar Exploration Themes. (Why are we going to the Moon?)

Theme	Description
Core Themes	
1. Use the Moon to prepare for future human missions to Mars and other destinations.	Reduce the risks and increase the productivity of future missions in our solar system by testing technologies, systems, and operations in an off-Earth planetary environment.
2. Pursue scientific activities to address fundamental questions about the solar system, the universe, and our place in them.	Engage in scientific investigations: — <i>Of the Moon</i> : Study the history of the Moon and the current lunar environment to learn about the evolution of our solar system; — <i>On the Moon</i> : Understand the effects of the lunar environment on the Moon's inhabitants and their equipment; — <i>From the Moon</i> : Use the Moon as a platform for performing scientific investigations, observing the Earth and other celestial phenomena.
3. Extend sustained human presence to the Moon to enable eventual settlement.	Develop the knowledge, capabilities, and infrastructure required to live and work on the Moon, with a focus on continually increasing — The number of individuals that can be supported on the Moon; — The duration of time that individuals can remain on the Moon; — The level of self-sufficiency of lunar operations; — The degree of non-governmental activity.
Crosscutting Themes	
4. Expand Earth's economic sphere to encompass the Moon, and pursue lunar activities with direct benefits to life on Earth.	Create new markets, based on lunar and cis-lunar activity, that will return economic, technological, and quality-of-life benefits to all humankind.
5. Strengthen existing and create new global partnerships.	Enhance global security by providing a challenging, shared, and peaceful global vision that unites nations in collaborative pursuit of common objectives.
6. Engage, inspire, and educate the public.	Use a vibrant exploration program to excite the public about space, encourage students to pursue careers in high technology fields, and ensure that individuals enter the workforce with the scientific and technical knowledge necessary to sustain exploration.

расмось там робити?» НАСА запевняє численні національні космічні агентства, а також комерційні і академічні співтовариства в тому, що всі їхні інтереси знайдуть відображення в цій стратегії. Тому вона пропонується для всестороннього обговорення.

Хоча на першому етапі цієї стратегії увага зосереджується на автоматичних і пілотованих

дослідженнях Місяця, у майбутньому вона буде зосереджуватись на дослідженнях Марса та інших об'єктів. НАСА виділяє шість ключових тем глобальної стратегії досліджень Місяця (Table 1), а конкретні цілі цих досліджень сформульовані для 23 категорій, які охоплюють різні сфери людської діяльності (Table 2).

Table 2. Lunar Exploration Objectives

Category	Objective ID Number	Name
Astronomy and Astrophysics	mA1	Perform radio astronomy from the Moon to observe the Sun and other astronomical objects.
	mA2	Perform interferometry on the lunar surface.
	mA3	Perform optical/near-infrared astronomy from the Moon.
	mA4	Detect gravitational waves to understand gravitational physics and test theories of General Relativity.
	mA5	Detect and monitor exoplanets.
	mA6	Perform long-duration study of energetic phenomena visible from the Moon.
	mA7	Use the Moon to search for cold dark matter candidates.
Earth Observation	mEO1	Use the Moon as a remote sensing platform for monitoring the Earth.
Geology	mGEO1(1-4)	Understand the origin and structure of the Moon.
	mGEO2	Characterize new impact events similar to those that would degrade more quickly on other planets.
	mGEO3(1-2)	Characterize the broad geology of the Moon.
	mGEO4(1-2)	Characterize impact cratering flux over the Moon's geologic history.
	mGEO5(1-2)	Study meteorite impactors on the Moon.
	mGEO6	Understand the nature and history of solar emissions.
	mGEO7	Characterize and understand the regolith.
	mGEO8(1-2)	Characterize lunar volatiles.
Materials Science	mMAT1	Study the affects of the lunar environment on materials so as to design mitigation strategies for extended stays.
Human Health	mHH1	Study the effects of the lunar environment on human health so as to design mitigation strategies for extended stays.
	mHH2	Understand the affects of fractional gravity on human performance and human factors.
	mHH3	Improve remote medical practice infrastructure and technology for fractional gravity to improve health care on the Moon.
Environmental Characterization	mENVCH1	Characterize the lunar thermal environment to better understand the operational environment of the Moon.
	mENVCH2	Characterize geotechnical properties of surface materials to support lunar civil engineering.
	mENVCH3	Characterize radiation bombardment of the lunar surface to better understand the operational environment of the Moon.
	mENVCH4	Characterize micrometeorite bombardment of the lunar surface to better understand the operational environment of the Moon.
	mENVCH5	Characterize the dust environment of the lunar surface to better understand the operational environment of the Moon.
Operational Support Science	mOSS1	Engage in «kitchen science» activities to learn how to function in the lunar environment.
Life support and Habitat	mLSH1	Provide safe and enduring habitation systems to protect individuals, equipment, and associated infrastructure.
	mLSH2	Develop biologically based life support system components to support long duration human exploration missions.
	mLSH3	Develop and deploy Closed Life Loop Support Systems to increase self sufficiency of future long duration human exploration missions.

(continued)

Category	Objective ID Number	Name
Environmental Hazard Mitigation	mLSH4	Utilize the commercial sector to provide agriculture services on the Moon to support life support systems.
	mLSH5	Utilize the commercial sector to provide food services on the Moon to support human habitation.
	mLSH6	Utilize the commercial sector to provide waste management services on the Moon to aid life support.
	mLSH7	Utilize the commercial sector to provide health care services on the Moon to aid life support operations.
	mEHM1	Provide radiation shielding for surface operations to protect crews, materials, and instruments.
	mEHM2	Evaluate and employ dust mitigation techniques to protect crews, materials and instruments during extended lunar stays.
	mPWR1	Develop power generation and storage systems required to facilitate increasing surface durations.
Power	mPWR2	Establish a power architecture where Earth-generated power is transmitted to the lunar surface and to cis-lunar transportation assets.
Communication	mCOM1	Implement a reliable and scalable telecommunications capability to support expanding telecom needs.
	mCOM2	Establish a commercial communications network that can provide high-bandwidth support for public engagement.
	mCOM3	Utilize the commercial sector to provide information services to the greatest extent possible.
Guidance, Navigation, and Control Surface Mobility	mNAV1	Establish GNC capabilities to support lunar operations.
	mSM1	Implement surface mobility systems to support both crew and cargo traverses over increasing distances.
Transportation	mTRANS1	Utilize the commercial sector to provide transportation services on the Moon and to and from the Moon to increase access to the Moon and traversing the Moon.
Operational Environmental Monitoring	mTRANS2	Demonstrate autonomous lander.
	mENVMON1	Monitor space weather to determine risks to lunar inhabitants.
General Infrastructure	mENVMON2	Monitor real-time environmental variables affecting safe operations.
	mGINF1	Utilize the commercial sector to provide finance and insurance services to support businesses operating on the Moon.
	mGINF2	Utilize the commercial sector to provide warehousing services on the Moon to support the lunar base.
	mGINF3	Utilize the commercial sector to develop infrastructure and utilities systems on the Moon to aid lunar operations.
	mGINF4	Emplace support services on the Moon to enable increased activities.
Operations, Test, and Verification	mGINF5	Develop lunar rescue systems.
	mOPS1	Demonstrate human surface operations capability.
	mOPS2	Demonstrate remote training and planning.
	mOPS3	Conduct Mars Analog tests on the lunar surface.
	mOPS4	Create a commercial astronaut corp to provide scientific, technical, and mission support to aid lunar science and operations.
	mOPS5	Utilize the commercial sector to provide arts, entertainment, and recreation on the Moon to provide leisure activities for those living on and visiting the Moon.
	mOPS6	Take advantage of the unique lunar environment to create recreation activities for lunar crews and visitors.
Lunar Resource Utilization	mOPS7	Evaluate astrobiology protocols and technologies that will be used to search for life on other planets.
	mLRU1	Understand the resource potential of the Moon.
	mLRU2	Use lunar resources to enable and support future exploration missions and destinations.
	mLRU3	Reduce reliance on Earth to create a self-sustaining lunar ecology.
	mLRU5	Prove safe utilization of ISRU resources.

(continued)

Category	Objective ID Number	Name
Historic Preservation	mLRU6	Utilize the commercial sector to provide construction services on the Moon to aid lunar base development.
	mLRU7	Utilize the commercial sector to provide manufacturing services on the Moon to aid ISRU.
	mLRU8	Provide Earth with energy derived from lunar resources.
	mLRU9	Perform lunar resources excavation, transport, delivery and construction on the lunar surface.
	mLRU10	Develop and demonstrate tools, technologies and systems to extract and process resources on the Moon.
	mHISP1	Create international lunar heritage sites to protect the record of early human lunar activity.
	mHISP2	Preserve an archive of Earth's civilization to mitigate the effects of any potential catastrophic events on Earth.
	mC1	Involve the commercial sector early on and throughout lunar development to embed them in all aspects of lunar activities and increase their involvement.
	mC2	Utilize public-private models to provide goods and services to jump-start commercial sector involvement.
	mC3	Create opportunities for commercialization pilot programs to enable low-cost development of commercial goods and services.
Commerce	mC4	Develop profitable lunar products for Earth and in-space use to demonstrate and take advantage of the commercial potential of the Moon.
	mC5	Create a strategy for transferring all aspects of government lunar activities to private industry to enable the shift of government resources to the next generation of projects and enhance commercial involvement on the Moon.
	mC6	Utilize government resources to catalyze more «exotic» industries for eventual ownership and operation by commercial firms.
	mC7	Establish the legal framework required to support commercial collaboration/cooperation on lunar exploration.
	mGP1	Establish a global partnership framework to enable all interested parties (including non-space faring nations and private companies) to participate in lunar exploration.
	mGP2	Establish standards and common interface designs to enable interoperability of systems developed by a global community.
	mGP3	Establish the legal framework required to support global collaboration/cooperation on lunar exploration.
Global Partnership	mGP4	As necessary, establish appropriate legal governance of lunar surface and orbital activities to enable commercial and governmental involvement.
	mGP5	Establish internationally recognized planetary protection mechanisms to prevent forward and backward contamination of the Moon.
	mGP6	Create a model society on the Moon.
	mEOR1	Provide opportunities to engage the public through direct and indirect participation in lunar activities to increase public support of the space program.
	mEOR2	Extend awareness of space activities to diverse, non-traditional communities, utilizing non-traditional means, to enhance public engagement.
Public Engagement and Inspiration	mEOR3	Demonstrate the value of lunar activities for Earth to raise public awareness of the lunar exploration program.
	mEOR4	Provide opportunities to educate students through direct and indirect participation in lunar activities to engage students in the space program.
	mPE1	Reduce bureaucracy associated with national space programs.
	mPE2	Define and execute a long-term exploration strategy, that includes the objectives of all stakeholders, to organize and time-phase future activities.
Program Execution		

Проект «Коронас—Фотон» — новий російський апарат для спостережень Сонця

(За матеріалами журналу «Новости космонавтики», № 7, 2006)

В рамках Федеральної космічної програми Росії з фундаментальних космічних досліджень ведеться робота над створенням третього апарату програми КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околовоземные Наблюдения Активности Солнца) — «Коронас—Фотон». За програмою КОРОНАС уже реалізовані проекти «Коронас-І» і «Коронас-Ф».

Новий науковий апарат призначений для дослідження процесів накопичення і трансформації енергії, а також вивчення механізмів прискорення, розповсюдження і взаємодії енергетичних частинок в Сонці, дослідження кореляції сонячної активності з фізико-хімічними процесами у верхній атмосфері.

Сукупні дані проектів «Коронас—Фотон» і «Коронас-Ф», а також КА «Yohkoh», GRO («Compton»), SOHO, «Ulysses», «Wind», RHESSI та супутників «Solar-B» і SDO дозволяють істотно просунутись в розумінні послідовності процесів, які приводять до вибухового процесу вивільнення енергії.

Головною організацією з нового апарату є Науково-дослідний інститут електромеханіки (НДІЕМ, м. Істра), а головним з комплексу наукової апаратури проекту — Московський інженерно-фізичний інститут (МІФІ).

Маса супутника становитиме близько 1900 кг, а маса комплекса наукової апаратури — близько 540 кг. Термін активного існування — не менше 3 років.

Запуск нового КА планується здійснити наприкінці 2007 р. Як і два попередніх, апарат планується вивести на колову орбіту висотою 550 км і нахилом 82.5°.

Об'єм наукової інформації, яка передаватиметься за один сеанс зв'язку, становитиме 2048 Мбіт.

Об'єм запам'ятованої наукової інформації за добу — 8.2 Гбіт.

Завдання проекту «Коронас—Фотон»

- Визначення функцій розподілу прискорених в спалаху електронів, протонів і ядер та їхньої еволюції з високим часовим розділенням.
- Дослідження різниці динаміки прискорення електронів і протонів.
- Дослідження особливостей еволюції функції розподілу для високоенергетичних частинок.
- Дослідження кутової анізотропії взаємодіючих частинок на основі статистичного аналізу спектрів випромінювання і параметрів лінійної поляризації жорсткого рентгенівського випромінювання.
- Вивчення ефектів направленості в області гамма-випромінювання високих енергій.
- Визначення механізмів і умов прискорення електронів і протонів на різних фазах спалаху, а також параметрів області утримання прискорених частинок.
- Визначення виду енергетичного спектру прискорених протонів і ядер і динаміки цих спектрів за співвідношенням ядерних гамма-ліній.
- Дослідження хімічного та ізотопного складу прискорених в спалаху ядер, а також енергетичних і часових характеристик спалахових електронів і протонів.
- Моніторинг поглинання жорсткого ультрафіолетового випромінювання спокійного Сонця у верхніх шарах атмосфери Землі.
- Дослідження рентгенівського і гамма-випромінювання гамма-сплесків.
- Дослідження процесів прискорення електронів до субрелятивістських енергій під час грозових явищ у верхніх шарах атмосфери Землі.

РОБОЧА НАРАДА «ДІЯЛЬНІСТЬ УКРАЇНСЬКОЇ ЛЛС-МЕРЕЖІ»

23—24 жовтня 2006 р. у Головній астрономічній обсерваторії НАН України (ГАО НАНУ) відбулась міжнародна робоча нарада «Діяльність української ЛЛС-мережі», що проходила при підтримці Українського центру визначення параметрів обертання Землі (УЦПОЗ). Наради з проблем розвитку національної мережі станцій лазерної локації штучних супутників Землі та Місяця стали традиційними і проводяться щорічно. А саме, наради проводились в Кримській лазерній обсерваторії (КЛО ГАО, смт Кацивелі, 2003), Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету (АО ЛНУ, смт Брюховичі, 2004), ДНТЦ «Оріон» (м. Алчевськ, 2005), ГАО НАНУ (м. Київ, 2006).

В робочій нараді взяли участь представники всіх українських станцій лазерної локації ШСЗ та Місяця (ЛЛС-станцій) як діючих («Голосіїв-Київ», «Кацивелі», «Сімейз», «Львів»), так і тих, які вводяться в експлуатацію: («Ужгород», «Алчевськ», «Євпаторія», «Дунаївці»), а також ЛЛС-станції HartRAO (Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory, Південна Африка) та Astronomisches Rechen-Institut Zentrum für Astronomie Univ. Heidelberg (Німеччина).

На нараді було проаналізовано стабільність роботи діючих українських ЛЛС-станцій за період 1984—2004 рр. та представлено загальний огляд їхньої діяльності протягом 2005—2006 рр. Показано, що основні недоліки, виявлені при дослідженні стабільності роботи діючих українських ЛЛС-станцій за 1984—2004 рр., мали місце і в 2005—2006 рр.

Основна увага на робочій нараді приділялася обговоренню досягнень і проблем українських ЛЛС-станцій за 2006 р.

Серед основних досягнень 2006 р. відзначено стабільну роботу ЛЛС-станції «Кацивелі». Завдяки придбанню та введенню в експлуатацію нового лазера вперше з початку року проведено спостереження понад 600 проходжень супутників. Покладено початок вирішенню ще однієї давнішньої проблеми (характерної і для інших українських ЛЛС-станцій): «омолоджується» штат працівників. Відмічено маштабність робіт на ЛЛС-станції «Алчевськ», яку заплановано ввести в експлуатацію до кінця 2006 р. Зокрема, інсталювано вимірювач інтервалів часу COMTIS та підготовлено до роботи лазерний передавач. Науково-технічні роботи, що проводились з початку року на ЛЛС-станції «Львів» (а саме переостування оптичної системи), хоч і були причиною довготривалого розриву в рядах спостережень, забезпечили значне зростання кількості спостережень при проведенні пробних локацій. Завдяки впровадженню системи зовнішньої калібривки на ЛЛС-станції «Сімейз» суттєво покращилася якість спостережень. Проводились систематичні роботи з розбудови ЛЛС-станції «Ужгород», зокрема відновлено блоки приводів крокових двигунів, на базі ТПЛ створено електрофотометр. Протягом року ЛЛС-станції «Євпаторія» та «Дунаївці» стабільно працювали у кутовимірному режимі.

На робочій нараді було підведено підсумки виконання ЛЛС-станціями INTAS-гранта № 03-59-11, наданого на розвиток інфраструктури ук-

райнських станцій космічної геодезії та геодинаміки. Зокрема, важливими результатами є створення в 2006 р. при підтримці гранта на ЛЛС-станціях «Сімеїз» та «Львів» нових стабільно функціонуючих інтернет-каналів, швидкість передачі даних по яких відповідає вимогам станцій.

До основних загальних проблем, які далися взнаки протягом 2006 р. на українських ЛЛС-станціях, можна віднести:

- відсутність на телескопах ЛЛС-станцій датчиків кутів (окрім станцій «Голосіїв-Київ», «Сімеїз», «Євпаторія», «Дунаївці»),
- проблеми з лазером станції (окрім станцій «Кацивілі» та «Алчевськ»),
- недоукомплектованість штату ЛЛС-станції, відсутність молодих кадрів,
- недостатність фінансування.

До суттєвих наробок робочої наради слід віднести вироблення установчих та процедурних документів. По-перше, було обговорено та внесено зміни у проекти нормативних документів «Положення про УЦПОЗ», «Положення про українську перманентну ЛЛС-станцію», «Положення про українську мережу ЛЛС-станцій». По-друге, було вироблено процедури обрання керівника української мережі ЛЛС-станцій та представника української ЛЛС-мережі в науково-координаційну раду УЦПОЗ шляхом відкритого голосування на

щорічних нарадах української ЛЛС-спільноти. Керівником української мережі ЛЛС-станцій та представником української ЛЛС-мережі в науково-координаційну раду УЦПОЗ на 2006-2007 рр. одноголосно було обрано керівника ЛЛС-станції «Голосіїв-Київ» к.ф.-м.н. М. М. Медведського.

Організатори висловлюють подяку за співпрацю учасникам робочої наради: Благодиру Ярославу (АО ЛНУ), Білінському Андрію (АО ЛНУ), Мотруничу Яношу (ЛКД УжНУ), Якубовському Володимиру (КЛО ГАО), Дмитроці Андрію (КЛО КрАО), Рихальському Володимиру (НЦУВ КЗ), Денищику Юрію (ДНТЦ «Оріон»), Мурзі В. (ДНТЦ «Оріон»), Жаліло Олексію (ХНУРЕ), Шелковенкову Дмитру (ХНУРЕ), Combrinck Willem Ludvig (HartRAO), Суберляку Василю (HartRAO), Берцику Петеру (ARI ZAH), Ліннику Леонію (Інститут напівпровідників НАНУ), Перетятку Миколі (ГАО НАНУ), Папу Віктору (ГАО НАНУ), Головні Мілентію (ГАО НАНУ), Рищенко Сергію (ЦПОСІ та КНП).

Організатори висловлюють подяку за надання гранта INTAS Infrastructure Actions Autumn 2003, INTAS Ref. Nr. 03 59-11.

О. БОЛОТИНА
М. МЕДВЕДСЬКИЙ