

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 9, № 5/6, 2003

KYIV

МАТЕРІАЛИ
Третій Української конференції
з перспективних космічних досліджень

15—21 вересня 2003 р.

Proceeding of the 3-rd Ukrainian Conference
for Perspective Space Researches
(15—21 September 2003)

ЗМІСТ

Анфимов Н. А., Лук'яненко В. І., Синельщиков М. В., Суворов В. В., Цимбалюк М. М. Современное состояние и перспективы развития работ в обеспечение эффективной реализации совместных российско-украинских экспериментов на РС МКС

Марков А. В., Кузнецов А. А., Сорокин И. В., Петрушевич И. Б., Шаманина Г. А., Локтева Н. И., Егорова О. И., Ушакова Т. А. Первые шесть экспедиций на МКС: итоги и перспективы реализации программ научно-прикладных исследований и экспериментов на российском сегменте

Шпак А. П., Федоров О. П., Живолуб Є. Л., Берсудський Є. Й., Шулешиова О. В. Пряме спостереження фазової границі кристал—розплав під час спрямованого твердіння сукиніонітрилу та півалової кислоти (наземні дослідження та підготовка польотного експерименту «Морфос»)

Шпак А. П., Ладико-Роев Ю. П., Рабочий П. П., Сальников Н. Н., Черемных О. К. Исследование стационарных режимов в установке кристаллизации по методу Бриджмена

Патон Б. Е., Аснис Е. А., Заболотин С. П., Баранский П. И., Бабич В. М. Получение сверхчистых объемных полупроводниковых материалов в условиях космического вакуума

Гаврилов Р. В., Похил Ю. А., Яковенко Л. Ф., Алексенко Е. Н., Лотоцкая В. А. Исследование влияния факторов космического пространства на циклическую долговечность материалов в условиях реального космического полета. Космический эксперимент «Пента-Усталость»

Броновец М. А., Гамуля Г. Д., Еланский Ю. А., Завгородний Л. Т., Скорогод В. В., Солнцев В. П., Сурду М. Н., Тихий В. Г., Фролов Г. А. Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения космического эксперимента «Материал — Трение»

Зеленый Л. М., Тамкович Г. М., Петрукович А. А., Застенкер Г. Н., Эйсмонт Н. А., Яновский М. И., Чесалин Л. С. Российско-украинский проект «Интербол-Прогноз» для исследования системы солнечно-земных связей. Высокоапогейный спутник «Интербол-3»

Котов Ю. Д., Юрьев В. Н., Болдырев С. И. Научные задачи и характеристики научной аппаратуры российского спутникового проекта КОРОНАС-ФОТОН

Архангельский А. И., Котов Ю. Д., Чистяков П. Ю. Цифровой процессор импульсных сигналов для спектрометрии заряженных частиц, нейтронов, рентгеновского и гаммаизлучения

Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Козырев А. С., Санин А. Б., Третьяков В. И., Гриньков В. Ю., Чарышников С. В., Бойnton U. V. Поиск воды на Марсе на основе данных российского прибора ХЕНД, установленного на борту американского космического аппарата «2001 Марс Одиссей»

CONTENTS

- 6 Anfimov N. A., Luk'iaschenko V. I., Sinel'schikov M. V., Suvorov V. V., Tsimbaliuk M. M. The present state and prospects of development of the work on the provision of appropriate realization of joint Russian-Ukrainian experiments at the Russian segment of the ISS
- 12 Markov A. V., Kuznetsov A. A., Sorokin I. V., Petrushkevich I. B., Shamanina G. A., Lokteva N. I., Egorova O. I., Ushakova T. A. Early six expeditions to the ISS: Some results and prospects of the realization of programs of scientific and applied investigations and experiments aboard the Russian segment
- 20 Shpak A. P., Fedorov O. P., Zhivolub E. L., Bersuds'kyy E. J., Shuleshova O. V. In-situ observation of solid-liquid interface during directional solidification of succinonitrile and pivalic acid (ground-based investigations and the preparation of flight experiment "Morphos")
- 24 Shpak A. P., Ladikov-Roev Yu. P., Rabochii P. P., Salnikov N. N., Cheremnykh O. K. The investigation of stationary regimes in a crystallization setup with the use of the Bridgeman method
- 30 Paton B. Ye., Asnis Ye. A., Zabolotin S. P., Baranskii P. I., Babich V. M. Deriving ultrapure three-dimensional semiconductor materials under space vacuum conditions
- 33 Gavrilov R. V., Pokhyl Yu. A., Yakovenko L. F., Aleksenko E. N., Lototskaya V. A. Investigation of sf influence on cyclic durability of materials in real space flight conditions. SE "Penta-Fatigue"
- 40 Bronovets M. A., Gamulia G. D., Yelanskii Yu. A., Zavgorodnyi L. T., Skorokhod V. V., Solntsev V. P., Surdu M. N., Tikhii V. G., Frolov G. A. The orbital tribometer and new materials for the performance of the "Material—Friction" space experiment
- 47 Zelenyi L. M., Tamkovich G. M., Petrukovich A. A., Zastenker G. N., Eismont N. A., Yanovskii M. I., Chesalin L. S. The Russian-Ukrainian project "Interbol-Prognoz" for the investigation of solar-terrestrial relations. The high-apogee satellite "Interbol-3"
- 53 Kотов Yu. D., Yurov V. N., Boldyrev S. I. Scientific objectives and instruments of the Russian satellite project CORONAS-PHOTON
- 60 Arkhangelsky A. I., Kотов Yu. D., Chistjakov P. Yu. Digital pulse processor for spectrometry of charged particles, neutrons, X-ray, and gamma-ray
- 65 Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Kozyrev A. S., Sanin A. B., Tret'iakov V. I., Grinkov V. Yu., Charyshnikov S. V., Boiniton U. V. A search for water on Mars from data of the Russian device HEND installed aboard the American space mission "2001 Mars Odyssey"

- Яценко В. О., Бекмуратов Т. Ф., Бідюк П. І., Бойко В., Живило С. Д., Ісмайлі Х. М., Козоріз В. В., Козоріз О. В., Кунцевич В. М., Набієв О. М., Негрійко А. М., Плішко Н., Черемніх О. К., Яценко Л. П.** Розробка кріогенно-оптичного датчика для високочутливих гравітаційних вимірювань
- Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тирнов О. Ф., Черногор Л. Ф.** Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере
- Архангельская И. В.** Применимость фрактального анализа для обработки временных профилей нестационарных событий, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф в эксперименте на космическом аппарате КОРОНАС-Ф
- Федоренко А. К.** Вариации ионного состава F₂-области ионосферы вблизи утреннего терминатора по данным спутниковых наблюдений
- Черногор Л. Ф.** Земля—атмосфера—геокосмос как открытая динамическая нелинейная система
- Залубовский И. И., Карташев В. М., Ковтун В. Е., Минко О. К., Шматко Е. С.** Всплески потока быстрых нейтронов на поверхности Земли как завершение процесса высыпания энергичных протонов из зон захваченной радиации
- Парновский А. С., Черемных О. К.** Анализ спектра собственных МГД-возмущений «теплой» плазмы во внутренней магнитосфере Земли
- Бездонный В. Г., Буданов О. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М.** Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне
- Готянян О. Є., Івченко В. М., Panoport Ю. Г.** Зв'язок характеристик одинарного літосферного джерела акусто-гравітаційних хвиль та іоносферного відгуку
- Клименко Ю. А., Черемных О. К.** Особенности распределения заряда на мелкодисперсных пылевых частицах в низкотемпературной космической плазме
- Гельфрейх Г. Б., Цап Ю. Т., Копылова Ю. Г., Цветков Л. И., Гольдварт Т. Б., Наговицин Ю. А., Юровский Ю. Ф., Будзиновская И. А.** О природе пульсаций микроволнового излучения солнечных активных областей
- Гопасюк С. И., Гопасюк О. С.** Движение плазмы над областью температурного минимума
- Степанов А. В., Цап Ю. Т.** Сравнительный анализ конусных неустойчивостей в коронах Солнца и звезд
- Криводубский В. Н.** Проблемы солнечного динамо-цикла
- Баникова Е. Ю., Конторович В. М.** Определение параметров космических струй по их тонкой структуре в радио- и рентгеновском диапазонах
- Власенко В. П., Селиванов Ю. А., Сорокин А. Ф., Цюх А. М.** Синхронные наблюдения радиоизлучения Солнца на разных длинах волн
- Антонов А. В., Герасимов Ю. М.** Особенности двумерного восстановления изображения космических источников нелинейным методом
- Лялько В. І., Попов М. О., Петроchenko О. Ю., Рябоконенко О. Д., Сахацький О. І., Харечко О. Г.** Метод класифікації стану лісів за матеріалами аерокосмічної зйомки на основі принципу злиття даних
- 71** *Yatsenko V. O., Bekmuratov T. F., Bidiuk P. I., Boiko V., Zhyvilo S. D., Ismaili Kh. M., Kozoriz V. V., Kozoriz O. V., Kuntsevych V. M., Nabiiev O. M., Negrillo A. M., Plishko N., Cheremnykh O. K., Yatsenko L. P.* Development of the cryogenic-optical sensor for highly sensitive gravitation measurements
- 76** *Panasenko S. V., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Chernogor L. F.* Dynamical processes in the lower ionosphere
- 81** *Arkhangelskaja I. V.* The applicability of fractal analysis for the processing of temporal profiles of non-stationary events detected by the AVS-F apparatus during an experiment onboard the CORONAS-F satellite
- 89** *Fedorenko A. K.* Variations of ion concentration of F₂ region of the ionosphere in the vicinity of morning terminator from data of satellite observations
- 96** *Chernogor L. F.* The Earth—atmosphere—geospace environment system as an opened dynamic nonlinear one
- 106** *Zalyubovskyi I. I., Kartashev V. M., Kovtun V. E., Minko O. K., Shmatko E. S.* Bursts of fast neutron flows on the Earth's surface as the completion of the process of energetic proton scattering from the captured radiation zones
- 111** *Parnowski A. S., Cheremnykh O. K.* Analysis of spectrum of “Warm” plasma's mhd eigenperturbations in the inner Earth's magnetosphere
- 117** *Bezrodny V. G., Budanov O. V., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M.* Electromagnetic environment of the Earth at ELF
- 124** *Gotyanan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G.* The relation between characteristics of a single lithospheric source of acoustic-gravity waves and ionospheric response
- 130** *Klymenko Yu. O., Cheremnykh O. K.* Charge distribution features of fine-dispersed dust grains in low-temperature space plasma
- 136** *Gelfreikh G. B., Tsap Yu. T., Kopylova Yu. G., Tsvetkov L. I., Goldvarg T. B., Nagovitsin Yu. A., Yurovsky Yu. F., Budzinovskaya I. A.* On the nature of microwave pulsations from solar active regions
- 140** *Gopasyuk S. I., Gopasyuk O. S.* Plasma motions above the temperature minimum region
- 144** *Stepanov A. V., Tsap Yu. T.* Comparative analysis of loss-cone instabilities in the coronae of the Sun and stars
- 147** *Kryvodubskyi V. N.* Problems of solar dynamo-cycle
- 153** *Bannikova E. Yu., Kontorovich V. M.* Determination of jet parameters of extragalaxy sources from their fine structure in radio and X-bands
- 158** *Vlasenko V. P., Selivanov Yu. A., Sorokin A. F., Tsyukh A. M.* Simultaneous observations of the solar radiation at different radio frequencies
- 165** *Antonov A. V., Gerasimov Yu. M.* Peculiarities of a two-dimensional image reconstruction of space radiants by nonlinear method
- 168** *Lyalko V. I., Popov M. O., Petrochenko O. Yu., Ryabokonenko O. D., Sakhatskyi O. I., Kharechko O. G.* Method for forest state classification with the use of aerospace images based on data fusion method

<i>Агарков А. В., Макаров А. Л., Матвиенко С. А., Мелешко А. В., Селиванов Ю. А.</i> Комплексное исследование территории Украины по геофизическим параметрам с помощью космических систем «Січ-1М» и «Микроспутник»	174	<i>Agarkov A. V., Makarov A. L., Matvienko S. A., Meleshko A. V., Selivanov Yu. A.</i> A combined investigation of the territory of Ukraine on the basis of geophysical parameters with the use of “Sich-1M” and “Microsputnik” space systems
<i>Паненко В. В.</i> О гибридных аналогово-цифровых методах обработки аэрокосмических изображений морской поверхности	180	<i>Panenko V. V.</i> On hybrid analogous-digital methods of treatment of aerospace images of sea surface
<i>Кочубей С. М.</i> Оценка основных параметров сельскохозяйственных посевов по спектру отражения растительности в оптическом диапазоне	185	<i>Kochubei S. M.</i> Estimation of the main characteristics of agricultural crops from reflectance spectrum of vegetation in the optical range
<i>Макаренко В. В., Колодяжный О. А.</i> Геопросторовий аналіз картографічних даних та інформації ДЗЗ для відслідування змін та прогнозування зсуви небезпечності	191	<i>Makarenko V., Kolodiaznyi O.</i> Geospatial analysis of maps and remote sensing information for change detections and predictions of landslide safety
<i>Бушуев Е. И., Волошин В. И., Махонин Е. И., Мосов С. П.</i> Системные схемы технологий обработки данных ДЗЗ	196	<i>Bushuev E. I., Voloshin V. I., Mahonin E. I., Mosov S. P.</i> System process flowsheets of remote sensing data processing
<i>Федякин А. И., Зубко В. П., Заяц С. В., Мамчук В. М.</i> Методологические аспекты оценки эффективности космических систем дистанционного зондирования Земли	202	<i>Fedyakin A. I., Zubko V. P., Zayats S. V., Manchuk B. M.</i> Methodology aspects of efficiency estimation of space remote sensing systems
<i>Кудашев Е. Б.</i> Электронная библиотека спутниковых данных: доступ к коллекциям экологического мониторинга	207	<i>Kudashov E. B.</i> An electronic library of space data -- the access to collections of ecological monitoring
<i>Мищенко Л. Т., Кюне Т., Мищенко И. А., Бойко А. Л.</i> Инфекционный процесс вируса полосатой мозаики в клино-статированных растениях пшеницы Апогей	211	<i>Mishchenko L. T., Kühne T., Mishchenko I. A., Boyko A. L.</i> Infection process of wheat streak mosaic virus in clinostated Apogee wheat plants
До 85-річчя від дня народження президента Національної академії наук України академіка Б. Є. Патона	216	85th birthday of Academician B. Ye. Paton
НАШІ АВТОРИ	225	OUR AUTHORS

Програмний комітет конференції

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



Учасники Третьої Української конференції з перспективних космічних досліджень

*— 27 листопада 2003 р. виповнюється 85 років
головному редакторові журналу «Космічна наука і технологія»,
президентові Національної академії наук України,
академіку*

Борису Євгеновичу ПАТОНУ

*Редакційна колегія журналу сердечно вітає Бориса Євгеновича з ювілеєм
і зичить йому міцного здоров'я та наснаги
для здійснення всіх його творчих задумів.*

Н. А. Анфимов¹, В. И. Лукьянченко¹, М. В. Синельщиков²,
В. В. Суворов¹, М. М. Цимбалюк¹

¹Центральний науково-дослідний інститут машинобудування
Російського авіаційно-космічного агентства (Росавіакосмосу), Корольов, Московська область, Росія

²Російське авіаційно-космічне агентство (Росавіакосмос), Москва, Росія

Современное состояние и перспективы развития работ в обеспечение эффективной реализации совместных российско-украинских экспериментов на РС МКС

Розглянуто сучасний стан робіт з підготовки спільних російсько-українських досліджень та експериментів на російському сегменті Міжнародної космічної станції (РС МКС). Викладено основні результати робіт з космічних експериментів (КЕ) першої черги і оцінено можливості підготовки до реалізації деяких експериментів другої черги.

В течение ряда лет ЦНИИМАШ, РКК «Энергия» им. С. П. Королева с участием головных организаций по направлениям исследований Координационного научно-технического совета по формированию программ исследований и экспериментов на пилотируемых космических комплексах (КНТС) Росавиакосмоса ведут работы по обеспечению реализации совместных российско-украинских исследований и технологических экспериментов на РС МКС [1—3].

К настоящему времени совместными усилиями российских и украинских ученых и специалистов разработана, согласована и подготовлена к утверждению «Долгосрочная программа совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на российском сегменте МКС». Она одобрена решением совместного совещания Российского авиационно-космического агентства и Национального космического агентства Украины от 15 февраля 2002 г., однако российскими и украинскими представителями неоднократно высказывались предложения о необходимости утверждения этой программы Генеральным директором Росавиакосмоса и Генеральным директором Национального космического агентства Украины.

© Н. А. АНФИМОВ, В. И. ЛУКЬЯНЧЕНКО, М. В. СИНЕЛЬЩИКОВ,
В. В. СУВОРОВ, М. М. ЦИМБАЛЮК, 2003

Это, по мнению сторон, будет способствовать повышению статуса программы.

Большая работа проведена по разработке, согласованию и подготовке к представлению на утверждение «Положения о порядке реализации «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на российском сегменте МКС» и использования полученных результатов».

К настоящему времени разработано более семи версий этого документа. Практически документ полностью подготовлен к представлению на утверждение.

На российско-украинской рабочей встрече 26 июня 2003 г. согласованы мероприятия для обеспечения передачи российской стороне научной аппаратуры изготовленной в Украине по процедурам, предусмотренным международными партнерами по созданию и целевому использованию МКС.

В последнее время при активном участии КНТС Росавиакосмоса, ЦНИИМАШ и РКК «Энергия» им. С. П. Королева проведен ряд рабочих совещаний, на которых удалось определить совместные проекты, реализация которых возможна уже в ближайшее время и сформировать эффективную

кооперацию научных и производственных организаций двух стран. О том, какое внимание уделяет этим работам руководство Росавиакосмоса и КНТС Росавиакосмоса, свидетельствует тот факт, что в повестках дня всех заседаний КНТС Росавиакосмоса и его Президиума за последние два года предусматривалось обсуждение вопросов реализации совместных российско-украинских исследований и экспериментов на РС МКС. В частности, в работе заседания Президиума КНТС Росавиакосмоса от 27.12.2001 г. принимал участие заместитель начальника управления Национального космического агентства Украины А. Б. Камелин.

К концу 2002 г. суммарная масса модулей и элементов МКС, находящихся на орбите, составила около 177 тонн, из них российский сегмент — 38 тонн. На МКС имеется значительное количество первоклассной научной аппаратуры. Катастрофа «Колумбии» несколько замедлила работы по комплектованию МКС оборудованием и проведению научных исследований.

Все международные партнеры по программе МКС рассматривают станцию в первую очередь как уникальную многопрофильную научную лабораторию для реализации программ научно-прикладных исследований и технологических разработок, а также как форпост для освоения космического пространства человечеством. Участники проекта активно содействуют развитию перспективных направлений целевого использования МКС для создания новых продуктов, совершенствования производственных технологий и предоставления различных услуг.

Несмотря на достигнутый определенный прогресс в строительстве станции, в последнее время все участники проекта, в первую очередь США и Россия, столкнулись с проблемами ограничения бюджетного финансирования программы МКС.

В этой ситуации стратегия ориентации на удовлетворение потребностей пользователей станции явилась основой для совместного поиска непростого, но необходимого решения по изменению конфигурации станции в интересах максимального удовлетворения требований целевого использования станции с учетом располагаемых ресурсов.

Партнеры единодушно одобрили план развития МКС таким образом, чтобы в 2006—2007 гг. максимизировать целевую отдачу МКС за счет наращивания технических возможностей и увеличения постоянного экипажа.

Предполагается эффективное использование имеющегося на борту оборудования и располагаемых ресурсов, оптимизация исследовательских программ, работ экипажа и необходимого грузопотока, а также возможная интеграция исследовательских

программ партнеров, в том числе развитие совместных исследований.

Подтверждением жизнеспособности отмеченной тенденции является существенная активизация работ в обеспечение реализации совместных российско-украинских исследований и экспериментов (табл. 1).

В частности, Росавиакосмос поддержал предложения ИКИ РАН о расширении кооперации в совместном российско-украинском эксперименте «Обстановка (Этап-1)» (предполагается участие ученых Великобритании, Болгарии, Венгрии, Польши), что позволит ускорить создание научной аппаратуры при значительном уменьшении необходимого финансирования.

К настоящему времени по этому эксперименту завершено эскизное проектирование научной аппаратуры. Ведется разработка конструкторской документации (КД) и научной аппаратуры (НА).

Совместный эксперимент «Планетный мониторинг — Спектрометр-поляриметр» (ПМ-СП) способен обеспечить проведение полноценных планетных исследований с борта РС МКС. Полностью согласовано техническое задание (ТЗ). В проекте предполагается участие ученых европейских стран. Практически завершено эскизное проектирование, ведется подготовка конструкторской документации и разработка научной аппаратуры. В работах организаций Украины принимают участие российские специалисты с целью увязки проектных решений и согласования параметров аппаратуры.

Указанные эксперименты, по мнению российской стороны, относятся к категории наиболее близких к практической реализации.

К этой же категории космических экспериментов (КЭ) может быть также отнесен и эксперимент «Биополимер», для которого проводятся реальные работы по подготовке бортовых укладок и отбору проб.

По КЭ «Морфос», «Пента—Усталость», «Материал—Трение» завершено согласование и утверждение ТЗ, развернута работа по согласованию планов-графиков. По КЭ «Материал—Трение» планографик РКК «Энергия» им. С. П. Королева согласован. По этим экспериментам российской стороной также открыто финансирование.

ТЗ на совместный эксперимент «Трубка» согласовано и утверждено. Получено положительное экспертное заключение о технической реализуемости. По этому эксперименту финансирование российских организаций предполагается открыть уже в следующем финансовом году.

Реальное продвижение наметилось в области подготовки реализации актуального в научном и прак-

Таблица 1. О ходе работ по совместной российско-украинской программе исследований и экспериментов на РС МКС (первая очередь КЭ)

№№ п/п	Условное наименование экспериментов	Основные участники работ с российской стороны	Выполняемые этапы работ	Оценка реализуемости КЭ
1.	«Биосорбент»	РАО «Биопрепарат», ГНИИ ОЧБ	Согласование и утверждение ТЗ. Экспертиза технической реализуемости КЭ	Реализуем на Служебном модуле (СМ) при обеспечении требуемых условий доставки и хранения препаратов
2	«Морфос»	ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК	Утверждено ТЗ. Получено положительное заключение о технической реализуемости. Открыто финансирование	Реализуем на СМ
3	«Материал—Трение»	ЦНИИМАШ, ИМАШ РАН, ИПМ РАН, НПО им. С. А. Лавочкина, ВНИИтрансмаш, МНСТ и др.	Утверждено ТЗ. Получено положительное заключение о технической реализуемости. Утвержден план-график совместных работ. Сформирована кооперация. Открыто финансирование	Реализуем на СМ+Стыковочный отсек 1 (СО1). Возврат на «Шаттле»
4	«Обстановка (Этап-1)»	ИКИ РАН	Эскизное проектирование. Разработка КД и НА. Сформирована международная кооперация. Открыто финансирование	Реализуем на СМ
5	«Планетный мониторинг—Спектрометр—поляриметр» (ПМ—СП)	ИКИ РАН	Эскизное проектирование. Разработка конструкторской документации и научной аппаратуры. Сформирована международная кооперация. Открыто финансирование	Реализуем на СМ
6	«Трубка»	ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», ИЦ им. М. В. Келдыша	Сформирована кооперация. Утверждено ТЗ. Получено положительное заключение о технической реализуемости	Реализуем на СМ+СО1. Возврат на «Шаттле»
7	«Технология»	РКК Энергия, ИХПМ, РГНИИ ЦПК	Согласование и доработка ТЗ. Проектная проработка отдельных технических вопросов реализации КЭ	Реализуем на последующих модулях при выполнении требований по энергообеспечению и вакуумированию НА
8	«Криокомплекс—Кипение»	ЦНИИМАШ, МЭИ, ИВТАН, ФИАН, ИФТТ РАН и др.	Предложена новая концепция группы космических экспериментов (ГКЭ) «Криокомплекс—Кипение» и этапы ее реализации. Разработано и согласовано ТЗ на ГКЭ. Проводится экспертиза технической реализуемости КЭ и подготовки к утверждению ТЗ	Реализуем на последующих модулях или с использованием транспортного грузового корабля (ТГК) типа «Прогресс» при решении проблем доставки криогенного блока и хладагентов
9	«Пента—Усталость»	ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», ЗАО «Композит-Тест»	Разработано, согласовано и утверждено ТЗ. Получено положительное заключение о технической реализуемости. Предложена кооперация организаций-исполнителей. Открыто финансирование	Реализуем на СМ+СО1
10	«Биолаборатория—М»	ГНЦ РФ ИМБП РАН с кооперацией	Согласованы цели, задачи, научно-методические подходы. Согласовано ТЗ, проводится экспертиза технической реализуемости и подготовка к утверждению ТЗ	Реализуем на последующих модулях при решении проблем размещения НА, ее энергообеспечения, создания необходимых условий доставки и хранения препаратов
11	«Биополимер»	МГУ (биологический факультет), РКК «Энергия»	Разработаны и согласованы ТЗ и методики выполнения эксперимента. Проведена научная и техническая экспертиза. Получено положительное заключение о технической реализуемости. Проведены работы по подготовке укладок и отбору проб	Реализуем на СМ

тическом отношении эксперимента «Биосорбент», по которому в настоящее время проводится экспертиза на техническую реализуемость и идет подготовка к утверждению ТЗ на КЭ.

Из обширной программы биологических исследований «Биолаборатория» к настоящему времени российскими и украинскими учеными согласована группа из шести экспериментов первой очереди «Биолаборатория–М». Техническое задание на группу экспериментов «Биолаборатория–М» в настоящее время проходит экспертизу на реализуемость. По предварительному мнению, принципиальных проблем не предвидится, однако есть ряд вопросов по подготовке биопрепараторов к экспериментам и хранению образцов после проведения исследований. Есть реальные пути решения указанных проблем при активном взаимодействии российских и украинских ученых и специалистов.

Следует отметить, что согласованные и утвержденные ТЗ существенно отличаются от их первоначальных вариантов. Большая работа по их совершенствованию как по научному содержанию, так и по форме выполнена российскими и украинскими постановщиками экспериментов при активном творческом участии КНТС Росавиакосмоса и СКИ НАНУ.

В качестве иллюстративного примера можно привести эксперименты «Материал–Трение», «Трубка», «Криокомплекс–Кипение» и др.

К работам по КЭ «Материал–Трение» усилиями российских ученых привлечен ряд ведущих научно-исследовательских организаций Республики Беларусь, которые имеют все возможности для существенного увеличения научной и практической отдачи предусматриваемых исследований.

КЭ «Криокомплекс–Кипение» является эволюционным развитием первоначально предлагаемого КЭ «Пента–Кипение», родившимся в процессе многократных проработок российских и украинских ученых–постановщиков совместно со специалистами РКК «Энергия» им. С. П. Королева вопросов целевой эффективности, безопасности и технической реализуемости криогенных экспериментов с использованием жидкого гелия на борту пилотируемых космических комплексов (РКК).

КНТС Росавиакосмоса, являющийся инициатором и активным участником многих совещаний в обеспечение реализации совместных российско-украинских экспериментов, рекомендует указанный эксперимент к реализации на РС МКС. В настоящее время завершаются достаточно трудоемкие проектные проработки в ходе экспертизы технической реализуемости этого эксперимента, и есть надежда, что в ближайшее время будет получено

положительное заключение о технической реализуемости КЭ «Криокомплекс–Кипение» и утверждено ТЗ на КЭ.

В части отмеченных экспериментов первой очереди еще предстоит большая работа по согласованию планов-графиков, а также по разработке, согласованию и утверждению «Соглашений о реализации совместных российско-украинских экспериментов». Кроме того, необходимо развернуть работы по разработке положения о порядке приема, обработки и распределения целевой информации и подготовке исходных данных для создания взаимно согласованных программно-методических материалов, необходимых для реализации КЭ.

В настоящее время формируется кооперация российских предприятий и организаций для проведения совместных российско-украинских космических экспериментов второй очереди.

С целью снижения затрат и сокращения сроков подготовки предлагаемых экспериментов к реализации при формировании эффективной кооперации внедряется стратегия оптимального использования имеющихся в России и Украине научных и производственных заделов.

В частности, прорабатывается возможность участия ЦНИИМАШ в подготовке и проведении совместных экспериментов «Материал–Пайка», «Диффузия–Моно», «Материал–Приоритет», «Кольцо», «Поверхня», «Сближение» (табл. 2).

По мнению российских ученых, КЭ «Материал–Пайка» представляет практический интерес при решении проблемы разработки современных конструкционных материалов для космической техники. Изучение смачивания и растекания металлических расплавов по большим поверхностям металлических и неметаллических материалов представляет практический интерес для разработки технологий пайки в условиях невесомости. К сожалению, в представленных российской стороне материалах отсутствует обоснование необходимости проверки справедливости закона смачиваемости (Юнга) в условиях микрогравитации.

Следует отметить, что аналогичные проблемы предполагается решать при выполнении КЭ «Ремонт». В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность объединения отдельных исследований, что позволит повысить эффективность работ при частичном снижении затрат.

В части эксперимента «Диффузия–Моно» положительные ожидаемые результаты возможны только при обеспечении диффузионного роста кристаллов. К сожалению, в имеющихся в распоряжении российской стороны материалах способы обеспечения условий такого роста не приведены. Не приве-

Таблица 2. О ходе работ по совместной российско-украинской программе исследований и экспериментов на РС МКС (вторая очередь КЭ)

№№ п/п	Условное наименование экспериментов	Основные участники работ с российской стороны	Выполняемые этапы работ	Возможные работы предполагаемых российских участников совместных экспериментов
1	«Материал–Пайка»	ЦНИИМАШ и др.	Формирование кооперации. Оценка возможности использования имеющихся научных и производственных заделов	Изучение влияния вибрационных микроДекораций на капиллярные эффекты, а также возможности управления этими эффектами с помощью дозированного вибрационного воздействия
2	«Диффузия–Моно»	ЦНИИМАШ и др.	Формирование кооперации. Оценка возможности использования имеющихся научных и производственных заделов	Разработка бортовых виброзащитных средств и исследование влияния вибраций на исследуемые процессы
3	«Материал–Приоритет»	ЦНИИМАШ и др.	Формирование кооперации. Оценка возможности использования имеющихся научных и производственных заделов	Разработка бортовых виброзащитных средств и исследование влияния вибраций на исследуемые процессы
4	«Сближение»	ЦНИИМАШ и др.	Формирование кооперации. Оценка возможности использования имеющихся научных и производственных заделов	Проведение совместных исследований с учетом заделов по российским КЭ «Каталог» и «Частица» на основе использования объективов с широким полем зрения и фотоприемников с двумерным растром
5	«Кольцо»	ЦНИИМАШ и др.	Формирование кооперации. Оценка возможности использования имеющихся научных и производственных заделов. Утверждено ТЗ. Получено положительное заключение о технической реализуемости	Исследования влияния инъекции заряженных частиц на потенциал поверхности МКС и на электроразрядную обстановку в плазменном окружении станции. Изучение взаимодействия ионных пучков с собственной атмосферой станции и магнитным полем Земли. Российская сторона предлагает использование блока диагностической аппаратуры СБД в КЭ «Платон» для регистрации параметров пучка ионов ксенона в плазменном окружении МКС
6	«Поверхня»	ЦНИИМАШ и др.	Формирование кооперации. Оценка возможности использования имеющихся научных и производственных заделов	Совместный эксперимент целесообразно осуществлять с учетом заделов по российскому эксперименту «Радар» (гол. организация — ЦНИИМАШ)

дены обоснования возможного влияния микрогравитации на диффузию в нагретых, т. е. твердых кристаллах. Требует дополнительного обоснования возможность применения полученных результатов исследований к процессу электрофоретического разделения веществ с учетом проблемы получения кристаллов с заданными свойствами.

Предлагаемый совместный эксперимент «Материал–Приоритет» носит глобальный характер и требует большой подготовительной работы. Цель исследований актуальна и имеет как научную, так и прикладную направленность, однако требуется дополнительная проработка возможности проведения заявленных космических экспериментов при уровне микрогравитации $10^{-4} g_0$.

Недостаточно полно обоснована осуществимость диффузионного механизма роста монокристаллов в реальных условиях космического полета.

ЦНИИМАШ имеет значительные возможности для непосредственного участия в подготовке и реализации КЭ «Материал–Пайка» в части изучения влияния вибрационных микроускорений на капиллярные эффекты и управления этими эффектами с помощью дозированного вибрационного воздействия.

В экспериментах «Диффузия–Моно» и «Материал–Приоритет» возможно участие ЦНИИМАШ в области разработки бортовых виброзащитных средств и исследования влияния вибраций на изучаемые процессы.

Исследования, предусматриваемые предлагаемым совместным экспериментом «Сближение», весомы и актуальны. Важную роль в них могут играть бортовые оптические средства наблюдения. В России многими организациями проводятся системно-технические исследования по определению рациональных путей построения, использования и оценки

эффективности таких средств при решении задач информационного обеспечения безопасного функционирования МКС (космические эксперименты «Каталог», «Частица», «Рапира», предусмотренные «Долгосрочной программой научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС» (версия 1999 г.)).

Предлагаемое в эксперименте «Сближение» использование оптической системы с узким полем зрения и фотоприемника с одномерным растром ограничивает возможности экспериментального исследования засоренности околоземного космического пространства (ОКП) с помощью бортовых оптико-электронных средств наблюдения.

По мнению российских специалистов целесообразно использование объективов с широким полем зрения и фотоприемников с двумерным растром (ПЗС-матриц), что обеспечивает возможность дополнительного решения следующих задач:

- обнаружение ранее не известных фрагментов космического мусора размером от 3 до 30 см и получение данных для их каталогизации; точность определения положения таких объектов без использования дополнительных данных может составить около 50 м;
- определение местоположения фрагментов мусора на круговых орбитах с точностью до 1 м.

ЦНИИМАШ были предложены технически и экономически обоснованные космические эксперименты «Каталог» и «Частица».

В настоящее время подготовлена вторая редакция ТЗ на эти эксперименты, в которой учтены результаты имитационной оценки точности определения параметров движения фрагментов КМ.

Учитывая высокую практическую значимость обеспечения безопасности МКС в условиях техногенного засорения ОКП и эффективность объединения усилий для решения указанной проблемы, ЦНИИМАШ считает целесообразным проведение совместных экспериментов с учетом направленности КЭ «Сближение», «Каталог» и «Частица».

В совместном российско-украинском эксперименте «Кольцо» (постановщики ИКИ НАНУ—НКАУ, ИКИ РАН и СПКБ «Дискрет») ЦНИИМАШ может принять участие в дополнении программы эксперимента исследованиями влияния инъекции заряженных частиц на потенциал поверхности МКС и на электроразрядную обстановку в плазменном окружении станции, а также исследованиями взаимодействия ионных пучков с собственной атмосферой станции и магнитным полем Земли.

Кроме того, российская сторона заинтересована в использовании блока диагностической аппаратуры СБД (изготавливаемого Украиной совместно с Рос-

сией), при реализации КЭ «Платон» (постановщик ЦНИИМАШ) для регистрации параметров пучка ионов ксенона в плазменном окружении МКС.

Проведение совместного эксперимента «Поверхня» целесообразно осуществлять с учетом заделов в реализации российского эксперимента «Радар» (главная организация — ЦНИИМАШ), который предусмотрен программой исследований, и по которому открыто финансирование.

Для ускорения совместных работ по перечисленным экспериментам второй очереди необходимо уже в ближайшее время установить деловые и научные контакты российских и украинских поставщиков обсуждаемых космических экспериментов.

В целом следует отметить значительный прогресс в работах по обеспечению эффективной реализации совместных российско-украинских экспериментов на РС МКС.

Российские ученые и специалисты выражают надежду, что эффективность совместных работ будет и далее возрастать, и уже в ближайшее время могут быть получены реальные научные результаты совместных космических исследований на РС МКС.

1. Анфимов Н. А., Лук'янченко В. И., Синельщиков М. В. и др. Основные результаты предварительного рассмотрения проекта «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС» // Космічна наука і технологія 2002.—8, № 5/6.—С. 9—14.
2. Анфимов Н. А., Синельщиков М. В., Суворов В. В., Цимбалюк М. М. Методология формирования целевой программы пилотируемого космического комплекса (ПКК) // Сб. тр. Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — Киев, 2001.—С. 11—15.
3. Лук'янченко В. И., Синельщиков М. В., Суворов В. В. Основные направления разработки российско-украинской программы совместных научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС // Сб. тр. Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — Киев, 2001.—С. 21—25.

THE PRESENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF THE WORK ON THE PROVISION OF APPROPRIATE REALIZATION OF JOINT RUSSIAN-UKRAINIAN EXPERIMENTS AT THE RUSSIAN SEGMENT OF THE ISS

N. A. Anfimov, V. I. Luk'iaschenko, M. V. Sinel'schikov, V. V. Suvorov, and M. M. Tsimbaliuk

We discuss the present state of the work on the preparation of joint Russian-Ukrainian investigations and experiments at the Russian segment of the International Space Station. The main results of the work on space experiments of the first turn are presented. The possibilities for the preparation to the performance of some experiments of the second turn are estimated.

А. В. Марков, А. А. Кузнецов, И. В. Сорокин,
И. Б. Петрушкевич, Г. А. Шаманина, Н. И. Локтева,
О. И. Егорова, Т. А. Ушакова

РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, Корольов Московської області, Росія

Первые шесть экспедиций на МКС: итоги и перспективы реализации программ научно-прикладных исследований и экспериментов на российском сегменте

Подано короткі підсумки реалізації російської довгострокової програми наукових досліджень за перші три роки пілотованого польоту МКС, а також наводяться перші статистичні дані про ресурси, потрачені на її виконання.

С моментастыковки 2 ноября 2000 г. с МКС транспортного пилотируемого корабля «Союз ТМ-31» с экипажем МКС-1 начался этап эксплуатации станции в пилотируемом режиме и проведение научных исследований и экспериментов.

На этапе сборки МКС приоритет отдается служебным операциям на российском и американском сегментах. Время, электроэнергия и другие ресурсы на научные исследования выделяются по остаточному принципу.

В 2001 году программа научно-прикладных исследований на российском сегменте МКС выполнялась российскими космонавтами первых четырех основных экспедиций, а также во время смены кораблей «Союз-ТМ32» и «Союз ТМ-33» экипажами первой и второй экспедиций посещения.

В ходе экспедиций посещения, кроме экспериментов по российской программе, выполнялись также программы исследований, разработанные учеными Казахстана «Гарыш» (ЭП-1) и Франции «Андромеда» (ЭП-2).

В 2002 году были продолжены эксперименты по научной программе в рамках основных экспедиций МКС-4 и МКС-5, а также во время смены кораблей

«Союз ТМ-34» и «Союз ТМА-1» экипажами третьей и четвертой экспедиций посещения.

В ходе этих экспедиций были выполнены целевые программы исследований, разработанные учеными Италии — «Марко Поло» (ЭП-3), Бельгии — «Одиссея» (ЭП-4), а также ЮАР — эксперименты М. Шаттльвorta (ЭП-3).

Всего за время пилотируемого полета на РС МКС (до августа 2003 г. включительно) проведено 90 экспериментов, из них 37 — по российской программе и 53 — по контрактным и международным программам.

По итогам выполнения российской программы НПИ в течение первых трех лет полета МКС в пилотируемом режиме можно сделать следующие выводы.

1. На борту двух российских модулей «Звезда» и «Пирс» российскими постановщиками начато размещение комплекса научной аппаратуры, который позволил начать единичные эксперименты по семи направлениям из одиннадцати, имеющихся в «Долгосрочной программе научно-прикладных исследований на РС МКС»:

— геофизические исследования;

	MKS-1	31.10.00	139 суток	18.03.01	
	MKS-2	08.03.01	166 суток ЭП-1 9 суток	20.08.01 06.05.01	
	MKS-3	11.08.01	127 суток ЭП-2 11 суток	15.12.01 31.10.01	
	MKS-4	06.12.01	192 суток ЭП-3 11 суток	15.06.02 05.05.02	
	MKS-5	06.06.02	180 суток ЭП-4 12 суток	02.12.02 10.11.02	
	MKS-6	24.11.02	161 сутки	04.05.03	
	MKS-7	26.04.03	185 суток	28.10.03	

Рис. 1. Длительность экспедиций на МКС

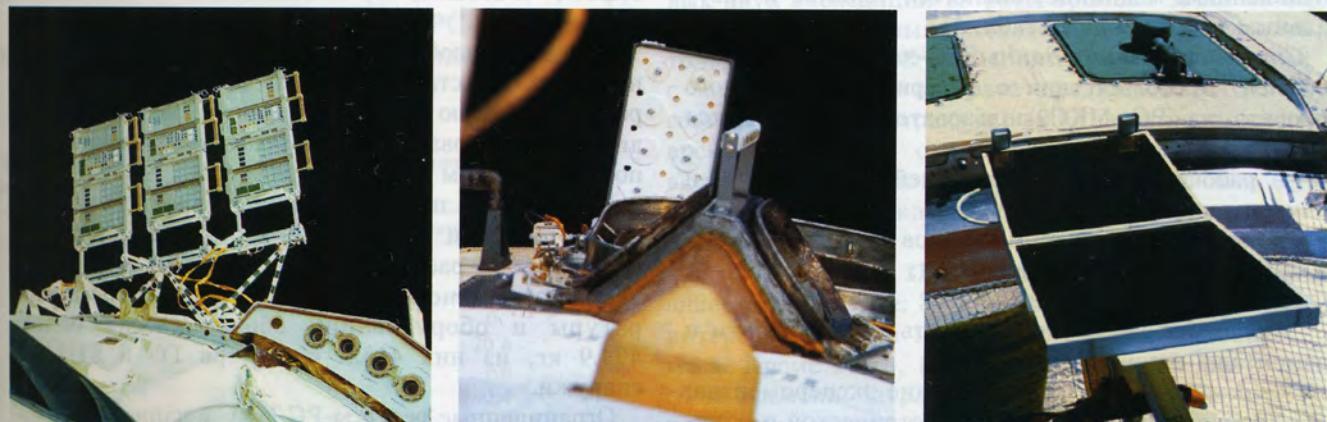


Рис. 2. Размещение научной аппаратуры на внешней поверхности служебного модуля РС МКС

Таблица 1. Распределение российских научных экспериментов по направлениям исследований

Отрасль	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Медицина, биология	10(2)	13	18
Техника	7	10	10
Природные ресурсы	1	1	1
Биотехнология	0	1	3
Проблемы энергетики	1	1	1
Геофизика	2	3	3
Космические лучи	0	1	1
Астрономия	0	0	0
Исследование планет	0	0	0
Технологии	0	0	0
Всего	21	30	37
Завершены	2	0	0

- медико-биологические проблемы;
- исследование природных ресурсов и экологический мониторинг (начиная с МКС-2);
- космическая биотехнология (начиная с ЭП-4);
- технические исследования и эксперименты;
- проблемы космических энергосистем и двигательных установок (начиная с МКС-3);
- исследования космических лучей (начиная с МКС-4).

2. По российской программе научных исследований за время пилотируемого полета на РС МКС была начата реализация 37 экспериментов (12 % от заявленных в долгосрочной программе). Исследования по двум медико-биологическим экспериментам «Виток-2» и «Массоперенос» к настоящему времени завершены.

3. Более 80 % экспериментов из реализуемых в настоящее время на РСМКС выполняются по традиционным для пилотируемой космонавтики направлениям: медицине, биологии, технике и визуальным наблюдениям (табл. 1).

Статистические данные по затраченным ресурсам. В соответствии с материалами эскизного проекта на РС МКС пользователям выделяются следующие ресурсы:

- рабочие места на внешней поверхности и внутри гермоотсеков;
- объемы внутри гермоотсеков для размещения и хранения научной аппаратуры;
- энергообеспечение;
- внекорабельная деятельность для установки и демонтажа научной аппаратуры;
- время экипажа на проведение экспериментов;
- каналы для передачи телеметрической и научной информации;
- грузопоток (доставка и возврат научной аппаратуры и оборудования).

Таблица 2. Объем доставленной аппаратуры, входящей в комплекс целевых нагрузок

Принадлежность	Комплекс целевых нагрузок, м ³			
	Научная аппаратура	Комплекс средств поддержки и обеспечения	Расходуемые материалы	Всего
Российская программа	0.69	0.12	0.1	0.91
Контрактные эксперименты	0.77	0.2	0.15	1.12
Всего	1.46	0.32	0.25	2.03

Размещение научной аппаратуры. Основную часть внутреннего объема модулей СМ и СО1 занимают служебные системы и средства обеспечения жизнедеятельности экипажа.

В настоящее время внутри СМ есть лишь два специально оборудованных места для установки и подключения научной аппаратуры.

Доставляемое оборудование размещается внутри станции на имеющихся свободных местах, исходя, в первую очередь, из соображений удобства экипажа:

- на панелях интерьера с фиксацией на ворсовой молнии либо под резиновыми фиксаторами;
- на поручнях и элементах каркаса интерьера с использованием замков;
- на иллюминаторах.

В настоящее время объем доставленной аппаратуры, входящей в комплекс целевых нагрузок (КЦН), составляет 2.03 м³ (табл. 2). Наибольший объем внутри СМ занимает научная аппаратура, используемая в экспериментах «Плазменный кристалл», «Растения-2», «Релаксация» и «Молния-СМ».

Учитывая необходимость выполнения контрактных обязательств, взятых на себя российской стороной, большую часть внутреннего объема приходится использовать для размещения оборудования по контрактным экспериментам.

На РС МКС после операций возврата укладок с результатами и утилизации использованного оборудования и расходных материалов в настоящее время размещено 110 наименований научной аппаратуры и оборудования общей массой более 494.9 кг, из них 413.6 кг внутри ГО и 81.3 кг снаружи.

Ограниченные ресурсы РС МКС в данной конфигурации (СМ+СО1) не позволяют проводить эксперименты с использованием НА, имеющей большие габариты.

На одном из рабочих мест в зоне усиленных обходных поручней на корпусе СМ на специально созданной ферме размещена аппаратура по контрактному эксперименту МРАС &SEED. На внешней поверхности СМ также размещено оборудование по экспериментам «Платан» (на кольцевом поручне 3-й плоскости) и «Кромка» (на ГЗУ около блока сопел двигателя ориентации), не использующее интерфейсов с бортом в части электропитания, передачи информации и терморегулирования.

Энергообеспечение аппаратуры. Из 37 российских экспериментов, которые реализуются в течение первых трех лет пилотируемого полета станции, научная аппаратура, требующая электропитания, используется в 22 экспериментах. Электропитание не требуется для выполнения 7 экспериментов, 8 технических экспериментов реализуются с использованием служебных систем.

По длительности работы аппаратуры в режиме потребления электроэнергии эксперименты распределяются следующим образом: 3 эксперимента — с постоянным энергопотреблением; 2 эксперимента — с длительным энергопотреблением (до нескольких суток); 17 экспериментов — с периодическим энергопотреблением (до нескольких часов).

При этом основным потребителем электроэнергии является аппаратура для медико-биологических и технических исследований. Суммарные энергозатраты при проведении медицинских и биологических экспериментов («Растения-2», «Диурез», «Профилактика») составляют 240 кВт·час, а по техническим («Глазменный кристалл», «Скорпион») — 67 кВт·час (табл. 3).

В настоящее время при проведении экспериментов постоянное среднесуточное энергопотребление научной аппаратуры не превышает 200 Вт, а кратковременное — 1 кВт.

Учитывая ограниченные ресурсы РС МКС в данной конфигурации (СМ + СО1), когда проведение

Таблица 3. Затраты электроэнергии на реализацию научных программ на РС МКС, кВт·ч

Станция	Российские эксперименты	Контрактные эксперименты
МКС-1	1.6	0
МКС-2	0.2	13.7
ЭП-1	1.3	0
МКС-3	0.27	20.6
ЭП-2	1.3	7.6
МКС-4	18.2	60.4
ЭП-3	1.3	4.9
МКС-5	84.4	21.1
ЭП-4	0.06	5.0
МКС-6	201.4	39.9

энергоемких экспериментов проблематично, изготовление научной аппаратуры с большой потребляемой мощностью пока не планируется.

Внекорабельная деятельность. Для выполнения ВнекД используются стыковочный отсек СО1 на российском сегменте и шлюзовая камера QUEST на американском сегменте.

Особенностью основных сборочных операций на МКС является то, что работы на российском сегменте, как правило, осуществляют экипаж станции, а сборку американского сегмента — экипажи кораблей «Шаттл».

По российской программе за время полета станции в пилотируемом режиме было выполнено восемь «Выходов»:

- МКС-3 — ВнекД №№ 2, 4, 4а по служебным операциям;
- ВнекД № 3 по экспериментам «Кромка», «МРАС &SEED» и «Взгляд»;
- МКС-4 — ВнекД № 5 по служебным операциям;
- ВнекД № 6 по служебным операциям и экспериментам «Кромка» и «Платан»;
- МКС-5 — ВнекД № 7 по служебным операциям;
- ВнекД № 8 по служебным операциям и экспериментам «Кромка» и «МРАС & SEED».

В табл. 4 представлены работы, выполнявшиеся экипажем при ВнекД по научной программе.

В интересах программы НПИ за первые 3 года пилотируемого полета было проведено три ВнекД общей продолжительностью 9 ч, что в среднем составляет 1 ВнекД в год.

Для сравнения можно отметить, что за 15 лет эксплуатации ОК «Мир» было проведено 78 «Выходов», из них 32 — в интересах выполнения научной программы, что составляло в среднем два «Выхода» в год.

Распределение времени экипажа. В ходе первых двух экспедиций затраты времени экипажа на проведение научных исследований определялись только объемом программы экспериментов. В связи с необходимостью возврата проданных НАСА (в соответствии с контрактом) 4000 часов российского времени, начиная с третьей экспедиции, время, выделенное на работу экипажа с российскими полезными нагрузками, определялось квотами (табл. 5).

В период с 3 по 13 экспедицию действует следующее соотношение: 87.5 % времени используется в интересах НАСА и 12.5 % в интересах Росавиакосмоса. Кроме этого, в случае отклонения фактического времени, затраченного экипажем на работу с полезными нагрузками, от выделенного по квотам, ведется учет компенсации с нарастающим итогом.

Увеличение общего количества экспериментов за счет доставки новой научной аппаратуры приводит

Таблица 4. Внекорабельные работы по научной программе, выполнявшиеся экипажем

№ ВнКД	Дата	Эксперимент								Суммар- ное время
		«Кромка»	Время	«Платан»	Время	MPAC & SEED	Время	«Взгляд»	Время	
3	15.10.01	Монтаж планшета № 0	40 мин	—	—	Монтаж трех панелей с образцами	4 ч	Установка логотипа «Кодак»	40 мин	5 ч 20 мин
6	25.01.02	Демонтаж планшета № 0, монтаж планшета № 1	1 ч 30 мин	Монтаж детектирующего блока «Платан-М»	20 мин	—	—	—	—	1 ч 50 мин
8	26.08.02	Демонтаж планшета № 1, монтаж планшета № 2	50 мин	—	—	Демонтаж панели № 1, переустановка панели № 2 на рабочее место панели № 1, сдвиг панели № 3 на новое место	1 ч	—	—	1 ч 50 мин
Итого			3 ч		20 мин		5 ч		40 мин	9 ч

Таблица 5. Распределение времени экипажа

Станция	Распределение времени экипажа, %		Фактическое время, ч		Компенсация за превышение квоты, ч		Возврат времени по контракту NAS15-10110, ч	Российские эксперименты, ч	Контрактные эксперименты, ч
	Россия	США	Россия	США	Россия → США	США → России			
MKC-1	50	50	69.00	47.00	11.00	—	—	64.25	5.25
MKC-2	50	50	51.00	263.11	—	106.06	—	42.25	12.25
MKC-3	12.5	87.5	130.85	201.35	89.33	—	32.25	48.25	191.25
MKC-4	12.5	87.5	58.00	337.72	8.54	—	139.86	96	26.8
MKC-5	12.5	87.5	73.90	279.66	29.71	—	102.88	114.8	57.2
MKC-6	12.5	87.5	73.48	277.18	0*	—	104.19	119	2.5
Всего	—	—	456.23	1406.02	32.52	—	382.18	484.55	295.25

* В соответствии с протоколом встречи российско-американской рабочей группы по операциям с ПН в августе 2003 г. достигнута договоренность не учитывать превышение Россией квоты для MKC-6 из-за невыполнения НАСА запланированных объемов исследований.

Таблица 6. Распределение времени экипажа по служебным и целевым операциям

Операции	Доля времени, %
Работы с полезной нагрузкой	12.0
Рутинные операции	25.0
Инвентарный учет	4.7
Переговоры с Землей	6.3
Передача смены	3.8
Тренировки и медицинские операции	11.0
Внекорабельные работы	7.6
Работы со служебными системами	29.6

к росту затрат времени экипажа на реализацию программы НПИ, которое является очень ограниченным из-за большого числа работ со служебными системами и рутинных операций, таких как ежедневные конференции (связь с ЦУПами), ознаком-

ление с программой полета, инвентаризация, подготовка отчетов и т. п.

В табл. 6 приведены сравнительные данные по распределению времени экипажа на различные операции на борту, полученные в ходе первых шести основных экспедиций МКС.

К сожалению, на операции с полезными нагрузками основной экипаж тратит лишь 12 % рабочего времени, что зачастую недостаточно для эффективного проведения экспериментов.

В отличие от основных экспедиций, временные ресурсы экспедиций посещения не лимитируются международными соглашениями и находятся полностью в распоряжении российской стороны. Значительная часть времени экипажа экспедиций посещения, выделяемая на проведение экспериментов, позволяет проводить большой объем научных исследований, в том числе на коммерческой основе, за короткий период нахождения экипажа на борту

Таблица 7. Время, затраченное экспедициями посещения на проведение экспериментов

Направление исследований	Затраченное время, ч : мин										
	МКС-1	МКС-2	ЭП-1	МКС-3	ЭП-2	МКС-4	ЭП-3	МКС-5	ЭП-4	МКС-6	Всего
Геофизические исследования	6:35	11:55	—	14:46	—	39:05	—	29:20	4:20	23:57	129:58
Медико-биологические проблемы	34:00	14:30	6:40	12:30	0:50	35:50	1:00	46:35	1:10	58:35	211:40
Исследование природных ресурсов	—	11:30	2:30	5:45	1:50	7:40	—	13:20	3:45	6:45	53:05
Биотехнологические исследования	—	2:20	—	—	—	—	—	—	1:15	1:15	4:50
Технические исследования	23:40	2:00	21:10	13:55	15:15	6:55	14:00	10:50	3:45	26:40	138:10
Энергетика и двигательные установки	—	—	—	1:20	—	4:10	—	6:55	—	1:00	13:25
Исследования космических лучей	—	—	—	—	—	2:20	—	—	—	—	2:20
Контрактные работы и эксперименты	5:15	12:15	10:40	191:15	54:55	26:50	94:08	54:20	101:45	2:10	553:33
Всего, ч : мин	69:30	54:30	41:00	239:31	72:50	122:50	109:08	161:20	116:00	120:22	1107:01

(табл. 7). Приведенные в таблице затраты времени экипажа на выполнение научной программы включают в себя также работы основного экипажа с полезной нагрузкой в личное время (дополнительно к квотируемому времени) и работы с научной аппаратурой в рамках проведения служебных операций (погрузка/разгрузка транспортных кораблей, первичный монтаж аппаратуры, подготовка к ВнекД).

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что 50 % времени российских экипажей было затрачено на проведение контрактных программ и экспериментов.

Всего шестью основными экипажами за три года эксплуатации станции в пилотируемом режиме на выполнение программы экспериментов затрачено 768 ч, а в период четырех экспедиций посещения — 339 ч.

В среднем затраты времени экипажа составили:

- основной экспедиции — 153 ч (0.9 ч/сут);
- экспедиции посещения — 83 ч (7.7 ч/сут).

Информационное обеспечение. Анализ информационных потоков по 37 российским экспериментам, реализуемым на РС МКС, показывает, что в настоящее время только в 10 экспериментах используются низкоинформационные каналы для передачи небольших объемов информации. При этом в 8 технических экспериментах сброс телеметрической информации (до 100 Кбайт на каждом витке) осуществляется в автоматическом режиме по служебному каналу системы бортовых измерений БИТС2-12.

По экспериментам «Кардио-ОДНТ» (до 2 Мбайт) и «Плазменный кристалл» (до 9 Мбайт) информация передается на Землю в реальном масштабе времени (по каналам РТС и БИТС 2-12, режим НП).

В 11 экспериментах — медицинских, биологиче-

ских, биотехнологических, геофизических и визуальных наблюдений данные в основном записываются на сменные электронные носители для последующего возврата на Землю раз в полгода. Кроме того, 4 эксперимента проводятся с пассивно экспонирующейся аппаратурой, а в 12 экспериментах осуществляется только отбор проб и не требуется предоставление информационных каналов.

Характеристики существующих систем РС МКС, обеспечивающих прием и передачу информации, представлены в табл. 8.

Аппаратура ТМО, позволяющая существенно увеличить скорости передачи информации с использованием телевизионного канала, в настоящее время находится на борту МКС, проводятся ее тестовые проверки для ввода в штатную эксплуатацию.

Как видно из таблицы, в настоящее время РС МКС располагает существенно ограниченными возможностями по передаче больших объемов телеметрической и цифровой информации, что не позволяет реализовывать научные эксперименты, требующие высокоинформационных каналов связи.

Доставка и возврат научной аппаратуры и оборудования. Всего за время существования станции (по состоянию на август 2003 г.) на РС МКС было доставлено 777.1 кг российской и зарубежной научной аппаратуры и оборудования (табл. 9).

За период с 2001 по 2003 гг. на Землю было возвращено около 155 кг материалов с результатами экспериментов и утилизировано 128 кг оборудования и расходуемых материалов.

Текущая сводка по массе комплекса целевых нагрузок к середине 2003 г. приведена в табл. 10.

К августу 2003 года на борту находятся 494 кг работоспособной аппаратуры комплекса целевых нагрузок, из них доставленной по российской программе НПИ — 298 кг.

Таблица 8. Характеристики существующих систем РС МКС, обеспечивающих прием и передачу информации

Система/аппаратура	Максимальная информативность, кбит/с	
	Борт—Земля	Земля—Борт
Система бортовых измерений БИТС2-12 (служебная система)	256	—
Радиотехническая система управления и связи (РСУС) «Регул-ОС» (служебная система)	16	13.2
Устройство сопряжения (УС) с системой телефонно-телеграфной связи (ТТС) (служебная система)	1.2	1.2
Блок сопряжения с РСУС «Регул-ОС» (БСР)	4.8	4.8
Телевизионный модуль обмена (ТМО) (планируется ввод в действие в конце 2003 г.)	2000	128

Таблица 9. Распределение доставленной на борт РС МКС научной аппаратуры по направлениям исследований

Направление исследований	Масса, кг
Контрактные работы	448.4
Исследования космических лучей	3.7
Проблемы энергетики	14.2
Технические исследования	102.1
Биотехнологические исследования	13.3
Исследование природных ресурсов Земли	4.4
Медико-биологические проблемы	107.1
Геофизические исследования	53.3
Общеобразовательные проекты	30.6

Таблица 10. Сводка по массе целевых нагрузок к середине 2003 г.

Состав	Масса аппаратуры и оборудования КПН, кг			
	На борту	Возвращено	Утилизировано	Всего
Научная аппаратура	368.3	79.1	82.7	530.1
Средства поддержки и обеспечения	94.6	25.3	16.1	136.0
Расходуемые материалы	30.8	50.7	29.5	111.0
Всего	493.7	155.1	128.3	777.1

Доставка научной аппаратуры осуществляется российскими транспортными грузовыми и пилотируемыми кораблями и в составе модулей (табл. 11). Возврат грузов — транспортными пилотируемыми кораблями «Союз» и американскими кораблями «Шаттл» (табл. 12).

Таблица 11. Распределение массы выводимой научной аппаратуры по средствам доставки (всего 777.1 кг)

Тип корабля	Масса, кг
В стартовом составе РС МКС (64.1 кг)	
СМ	5
СО	59.1
Транспортные грузовые корабли «Прогресс-М, М1» (599 кг)	
M1-4	3.1
M-44	86.3
M1-6	10.7
M-45	182.1
M1-7	57.8
M1-8	73.2
M-46	2.8
M1-9	127.6
M-47	31.6
M1-10	23.8
Транспортные пилотируемые корабли «Союз» (114 кг)	
TM-32	21.7
TM-33	20.5
TM-34	32.8
TMA-1	24.6
TMA-2	14.4

Таблица 12. Распределение массы возвращаемых результатов экспериментов по типам транспортных кораблей («Союз-ТМ, ТМА», «Шаттл»)

Тип корабля	Масса, кг
STS 5A.1	2.2
TM-31	12.6
STS 7A	8.4
STS 7A.1	0.7
TM-32	24.3
UF-1	0.2
TM-33	28.5
UF-2	0.4
TM-34	36.5
STS 11A	16.7
TMA-1	24.7
Всего	155.2
Из них на STS	28.6

На борт РС МКС десятью грузовыми и пятью пилотируемыми кораблями доставлено 713 кг научного оборудования, что в среднем составляет 60 кг на ТГК «Прогресс» и 23 кг на ТПК «Союз».

Возврат 155 кг укладок с результатами экспериментов осуществлен в составе четырех российских и пяти американских кораблей, в среднем 26 кг в СА «Союз» и 5 кг на КК «Шаттл».

Сводные данные. Накопленный объем информации по реализации программы НПИ за три года

Таблица 13. Сводные данные

Наименование параметра, ресурса	РС МКС (2003 г.)	ОК «Мир»
Количество рабочих мест вне ГО, из них:	6	33
— УРМ	2*	16
— УРМ с поворотными платформами	—	2
Объем для НА внутри ГО, м ³	2.0	18
Энергопотребление, кВт		
— среднесуточное	0.2	0.35
— кратковременное	1.0	2.0
Количество ВнeКД в год	1	2
Количество шлюзовых камер для работ с научной аппаратурой	—	3
Занятость экипажа в сутки, ч		
— основная экспедиция	0.9	2.4
— экспедиция посещения	7.7	7...8
Доставка НА, кг		
— на ТГК «Прогресс»	60	100
— на ТПК «Союз»	23	20
Возврат результатов в СА ТПК «Союз», кг	26	50
Скорость передачи информации, Мбит/с	0.256 — БИТС 700	0.256 — БИТС-23; 61.4 — БИСУ-ПМ; 16 — РПИ 2100
Количество сеансов экспериментов в год		

* планируются к развертыванию в 2004 г.

полета РС МКС позволяет сравнить средние показатели по каждому из выделенных ресурсов с аналогичными усредненными данными по ОК «Мир» (табл. 13).

Полученные данные по выполнению научных программ на РС МКС за прошедший период и накопленный опыт ОК «Мир» позволяют определить основные закономерности и параметры выполнения программы исследований и использовать их в дальнейшем при анализе реализуемости долгосрочной программы НПИ в целом и по этапам.

EARLY SIX EXPEDITIONS TO THE ISS: SOME RESULTS AND PROSPECTS OF THE REALIZATION OF PROGRAMS OF SCIENTIFIC AND APPLIED INVESTIGATIONS AND EXPERIMENTS ABOARD THE RUSSIAN SEGMENT

A. V. Markov, A. A. Kuznetsov, I. V. Sorokin,
I. B. Petrushkevich, G. A. Shamanina, N. I. Lokteva,
O. I. Egorova, T. A. Ushakova

We briefly review some results of the realization of the Russian long-term program of scientific investigations for early three years of piloted flight of the ISS. Some statistical data on resources expended for the program execution are presented.

УДК 548.5

А. П. Шпак, О. П. Федоров, Є. Л. Живолуб,
Є. Й. Берсудський, О. В. Шулешова

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, Київ

Пряме спостереження фазової границі
кристал—розплав під час спрямованого твердіння
сукционітрилу та півалевої кислоти
(наземні дослідження та підготовка
польотного експерименту «Морфос»)

Безпосередньо досліджується розвиток поверхні кристал-розплав в об'ємних (тривимірних) зразках при спрямованому твердінні у різних кристалографічних напрямках в наземних умовах та в умовах мікрогравітації. Розробляється польотна експериментальна установка «Морфос», призначена для вивчення спрямованого твердіння прозорих модельних речовин. Наводяться результати тестових наземних експериментів з три- та двовимірними зразками.

ВСТУП

Експериментальне вивчення процесу кристалізації в умовах мікрогравітації є одним з пріоритетних питань космічного матеріалознавства і відіграє значну роль у дослідницьких програмах. Використання прозорих речовин для вивчення процесу спрямованого твердіння є багатообіцяючим експериментальним підходом для кращого розуміння процесів формування кристалічної структури в космосі.

Використання тривимірних циліндричних зразків дає можливість у реальному часі безпосередньо відслідковувати як динаміку формування структури поверхні, так і конвективні течії в розплаві. Попередні дослідження [2—6], зокрема польотні експерименти, дають нове розуміння особливостей розвитку коміркової поверхні розділу, впливу на них потоків в розплаві, а також границь зерен. Серед інших спостерігались характерні динамічні ефекти, відсутність відбору певної довжини хвилі та наявність подовжених комірок тощо.

Прецизійний аналіз розвитку міжфазної границі в умовах мікрогравітації вимагає суттєвого розвитку методів прямого спостереження. Дані робота

присвячена прямому спостереженню мікроструктури фронту кристалізації для різних кристалографічних орієнтацій. Дновимірні та тривимірні зразки використовувались для дослідження росту монокристалів сукционітрилу (SCN) та півалевої кислоти (PA).

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Метою наземного тестування установки «Морфос» була підготовка до польотного експерименту та отримання послідовності морфологічних даних для монокристалів різних кристалографічних орієнтацій в широкому діапазоні швидкостей росту.

Експериментальна методика вирощування монокристалів за методом Бріджмена застосовувалась як для тривимірних так і для двовимірних зразків сукционітрилу. Установка «Морфос» для об'ємних зразків складається з блоків, зображені на рис. 1.

Електричний резистивний нагрівач та напівпровідниковий холодильник циліндричної форми розташовані на одній осі зі зразком. Цей блок забезпечує лінійний температурний градієнт до 5 К/мм;

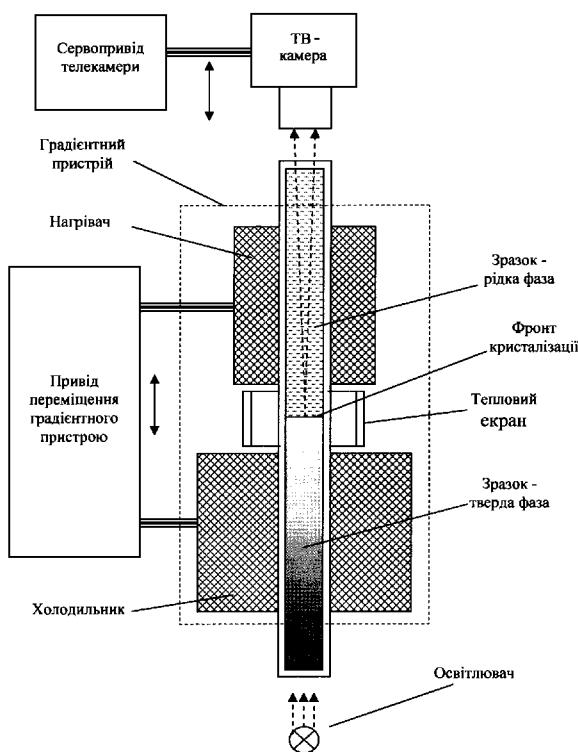


Рис. 1. Схематичне зображення установки для кристалізації об'ємних зразків

підтримання температур нагрівача та холодильника не гірше за 0.05 К. Зразок являє собою скляний циліндр довжиною 200 мм та 14 мм в діаметрі. Установка забезпечує інтервал швидкостей в робочому режимі від 0.1 до 30 мкм/с, який підтримується з точністю 5 %.

Застосована методика дозволяє спостерігати та фіксувати фронт кристалізації та прилеглих до нього ділянок кристалу безпосередньо у процесі росту через розплавлену зону. Оптичний блок складається з TV-камери, системи фокусування зображення та освітлювання. Він забезпечує різкість зображення, тобто коригує вплив оптичного шляху, що змінюється у процесі пересування фронту кристалізації вздовж зразка протягом експерименту.

Особлива увага надавалась розробці методики отримання монокристалів. Орієнтація прозорих монокристалів може бути визначена на дендритній стадії росту по симетрії розташування бокових гілок відносно дендритного стволу. Методика заснована на використанні профільованого пристрою, котрий дозволяє змінювати напрямок росту початкового кристалу на заданий кут. Були отримані кристалічні затравки орієнтацій $<100>$, $<110>$ та $<111>$. Для експерименту використовували сукцинонітрил промислової чистоти (до 99.84 %). На

фазовій границі підтримували постійний температурний градієнт 2.2 К/мм.

Передбачається декілька етапів створення та подальшої модернізації установки «Морфос». На першому етапі створюється польотна установка «Морфос-1» для спостереження морфології фронту в прозорих речовинах. Наступний варіант установки має дозволити відслідковувати та фіксувати також потоки розплаву поблизу фронту кристалізації та вивчати вплив вібраційної дії на процес формування кристалічної структури.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Сукцинонітрил. У діапазоні швидкостей вирощування 0.4—2.5 мкм/с спостерігали плоский фронт, нодну, коміркову та дендритну структури. Еволюція поверхні кристал—розплав фіксувалася протягом тривалого часу для монокристалів трьох кристалографічних орієнтацій. Формування нодної (або вузлової) структури спостерігалося для всіх зразків сукцинонітрилу різних кристалографічних орієнтацій як початкова стадія втрати стійкості. Картина оплавлення (при переміщенні кристалу у напрямку, протилежному напрямку росту) показала, що ноди збагачені домішками. Подібна структура спостерігалася також для двовимірних зразків.

Нодна та наступна коміркова структури характеризуються певною асиметрією (нестійкі структурні елементи виникають з одного боку зразка та поступово покривають всю поверхню фазової границі протягом вирощування). Якісні спостереження потоків перед фронтом (за допомогою чужорідних частинок, що пересуваються у розплаві) показують, що ця асиметрія зумовлена конвективним перемішуванням розплаву. Такі потоки, вірогідно, є результатом дії радіального градієнту температури, котрий зумовлює конвекцію навіть якщо гравітаційний вектор та градієнт температури антипаралельні.

Рис. 2 ілюструє залежність часу очікування τ (або, що те ж саме, зсув зразка, d) від швидкості вирощування. Час очікування — це час, потрібний для виникнення певної кількості нод (комірок) від початку вирощування. Як видно, нижче швидкості 0.5 мкм/с комірки не виникають, тоді як ноди з'являються при всіх використаних швидкостях.

Залежність $\tau(d)$ для нод та комірок виглядає по-різному: показник залежності $1/x^n$ для нод становить $n = 1.3 \pm 0.2$, для комірок — $n = 2.8 \pm 0.2$.

Застосування методу побудови мінімального зв'язуючого дерева (MST-метод [1]) дає кількісні дані щодо впорядкованості нодної і коміркової

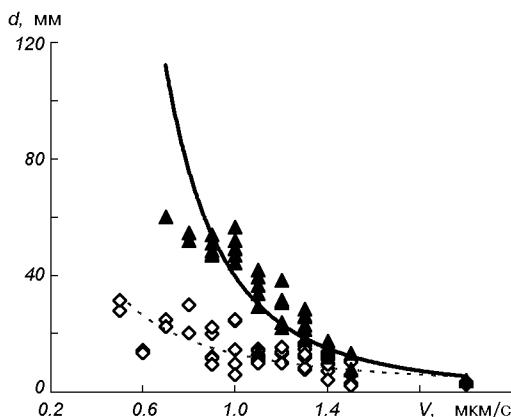


Рис. 2. Діаграма виникнення нод (ромбіки) та комірок (трикутники); сукцинонітрил, $<100>$, $V = 0.5\ldots2.0$ мкм/с

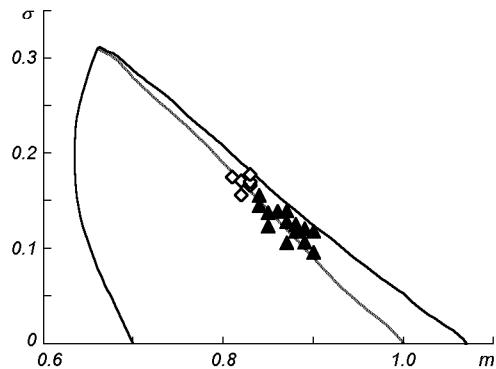


Рис. 3. MST діаграма для нод (ромбіки) та комірок (трикутники) (характеристика симетрії розташування структурних елементів); сукцинонітрил, $<100>$, $V = 1.1$ мкм/с, об'ємний зразок

структур (рис. 3). MST-дерево сполучає кожну ноду (центр комірок) таким чином, щоб мінімізувати довжину дерева. При цьому відслідковуються два параметри: середня довжина m ребра (елемента дерева), та стандартне відхилення σ довжини ребра від середнього значення. Згідно з процедурою [1] значення $m = 0.662$ і $\sigma = 0.311$ відповідають випадковому розподілу; значення $\sigma = 0$ — впорядкованій структурі (при $m = 1$ для квадратів, $m = 1.075$ для гексагонів).

Як видно з рис. 3, для монокристалів орієнтації $<100>$ впорядкованість нод змінюється з часом та наприкінці процесу вирощування наближується до такої, що характерна для комірок. Змін параметрів m та σ для комірок не виявлено, їхня симетрія відповідає симетрії слабоспотворених гексагонів.

Міжкоміркова відстань λ аналізується шляхом визначення середньої відстані між центрами комірок. Рис. 4 показує розвиток λ з часом для однакових зразків з одинаковими умовами росту в різних експериментах. Для всього діапазону швид-

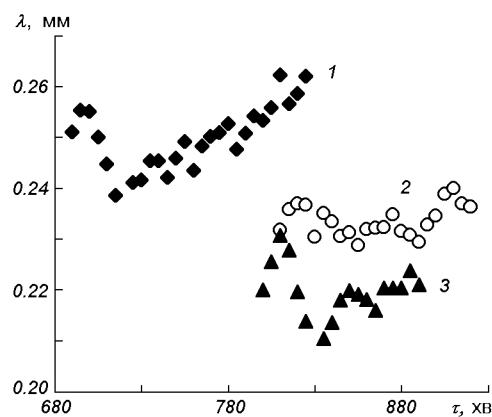


Рис. 4. Залежність міжкоміркової відстані λ від часу τ ; сукцинонітрил, $<100>$, $V = 1.0$ мкм/с, об'ємний зразок

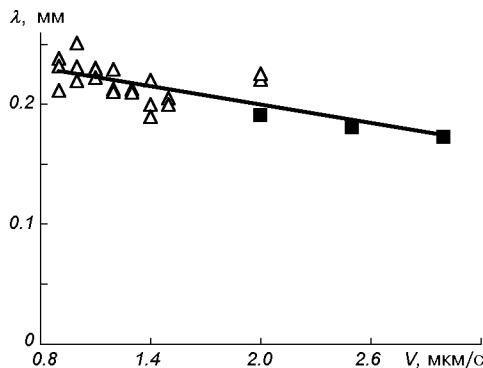


Рис. 5. Залежність міжкоміркової відстані λ від швидкості V : трикутники — оригінальні дані, квадратики — дані роботи [4]; сукцинонітрил, $<100>$, $V = 0.8\ldots3.0$ мкм/с

костей спостерігався такий характер еволюції структури фронту:

1) осциляції міжкоміркової відстані спостерігались протягом всього періоду розвитку поверхні. Амплітуда і частота осциляцій змінювались від експерименту до експерименту. Максимум осциляцій відповідає збільшенню кількості комірок приблизно на 1 %;

2) при тривалому періоді спостереження здійснюється подальше збільшення значень λ з часом;

3) залежність середніх значень λ від V (рис. 5) близька до отриманих в [3]. Спостереження двовимірних зразків з орієнтаціями що лежать поміж $<100>$ та $<110>$ дає додаткову інформацію про розвиток масиву нод і комірок:

- нодна структура повторюється на поверхні в усіх експериментах для кожної кристалографічної орієнтації монокристалів сукцинонітрилу;
- неперервне збільшення міжкоміркової відстані λ має такий же характер як і в експериментах на тривимірних зразках.

Монокристали сукционітрилу з орієнтаціями $<100>$, $<110>$ та $<111>$ використовувались для безпосереднього вивчення розвитку поверхні з однаковими умовами росту.

Монокристали $<100>$. В більшості випадків збурення зароджується в нодах та розвивається як гребні, що з'язують сусідні ноди. На кінцевому етапі гребні перетворюються в рівновісні комірки, які розподілені приблизно рівномірно по всій поверхні. В окремих випадках спостерігалось утворення гребенів у вільних від нод ділянках. Але незалежно від способу утворення результуюча коміркова структура була ідентичною. Не було помічено ніяких ознак подовжених комірок. Спостерігалося порушення деяких ділянок рівновісної коміркової структури субграницями: комірки, які ініційовані субграницями, повторюють їх форму; цей ефект може викликати враження, що в монокристалах $<100>$ утворюються подовжені комірки.

Монокристали $<110>$ та $<111>$. Головною відмінністю від орієнтації $<100>$ є поява ознак подовжених комірок. Потрібно відмітити, що ці комірки виражені не так явно, як в монокристалах металів або півалової кислоти; вони присутні досить короткий період часу та швидко трансформуються в рівновісні комірки. Мають місце деякі відмінності в діаграмах $m-\sigma$ та залежностях $\lambda(t)$ для рівновісних комірок монокристалів з орієнтаціями $<100>$, $<110>$ та $<111>$.

Півалева кислота. Монокристали півалової кислоти з орієнтаціями $<100>$ та $<110>$ використовувались для вивчення кристалографічних ефектів при структуроутворенні (півалевий кислоті притаманна більша кристалографічна анізотропія, ніж для сукционітрилу). Були знайдені такі характеристики:

- відсутність ознак нодної структури;
- залежності $\lambda(t)$ і $m(\sigma)$ такі ж, як і для сукционітрилу;
- встановлена певна відмінність в експериментальних кривих $d(t)$ для монокристалів півалової кислоти орієнтацій $<100>$ та $<110>$;
- у монокристалах півалової кислоти орієнтації $[110]$ подовжені комірки витягуються у напрямку $[110]$, тоді як для орієнтації $<100>$ виявляється рівновісна коміркова структура.

ВИСНОВКИ

1. Застосовані експериментальні методики довели ефективність розробленого підходу для дослідження особливостей кристалізації в космічних умовах.
2. Неперервне спостереження у реальному часі за розвитком фазової границі протягом спрямованого

твірдіння в земних умовах дає інформацію про суттєві динамічні ефекти при структуроутворенні:

- поява збурень (гребенів) на плоскій поверхні виглядає як процес зародкоутворення. Зовнішні джерела (межі та субмежі зерен, чужорідні включення) провокують появу таких гребенів. Однак спостерігається виникнення гребенів без видимого джерела; цей процес потребує певного часу очікування, який змінюється від експерименту до експерименту;
- ноди є першою стадією втрати стабільності; їхня густота та розташування суттєвим чином залежать від часу процесу кристалізації;
- міжкоміркова відстань осцилює з часом і поступово збільшується.

3. Кристалографічна анізотропія впливає на структуроутворення як на нодній, так і на комірковій стадіях розвитку поверхні.

1. Dussert C., Rasigni G., Rasigni M., et al. Minimal spanning tree: A new approach for studying order and disorder // Phys. Rev. B.—1986.—34, N 5.—P. 3528—3531.
2. Kauerauf B., Zimmermann G., Murmann L., et al. Planar to cellular transition in the system succinonitrile-acetone during directional solidification of bulk sample // J. Crystal Growth.—1998.—193.—P. 701—711.
3. Kauerauf B., Zimmermann G., Rex S., et al. Directional cellular growth of succinonitrile-0.075 wt % acetone bulk samples. Part 1. Results of space experiments // J. Crystal Growth.—2001.—223.—P. 265—276.
4. Kauerauf B., Zimmermann G., Rex S. et al. Directional cellular growth of succinonitrile-0.075 wt % acetone bulk samples. Part 2. Analysis of cellular pattern // J. Crystal Growth.—2001.—223.—P. 277—284.
5. Noel N., Jamgotchian H., Billia B. In situ and real-time observation of the formation and dynamics of a cellular interface in a succinonitrile-0.5 wt % acetone alloy directionally solidified in a cylinder // J. Crystal Growth.—1997.—181.—P. 117—132.
6. Noel N., Jamgotchian H., Billia B. Influence of grain boundaries and natural convection on microstructure formation in cellular directional solidification of dilute succinonitrile alloys in a cylinder // J. Crystal Growth.—1998.—187.—P. 516—526.

IN-SITU OBSERVATION OF SOLID-LIQUID INTERFACE DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF SUCCINONITRILE AND PIVALIC ACID (GROUND-BASED INVESTIGATIONS AND THE PREPARATION OF FLIGHT EXPERIMENT “MORPHOS”)

A. P. Shpak, O. P. Fedorov, E. L. Zhivolub,
Y. J. Bersudskyy, O. V. Shuleshova

We present some results of the direct study of the solid-liquid interface development in three-dimensional samples under directional solidification in different crystallographic directions in ground and microgravity conditions. The flight experimental set-up “MORPHOS” intended for the investigation of directional solidification of transparent substances is under development. The results of ground-based experiments with three-dimensional and quasi two-dimensional samples are presented.

УДК 536.24-464, 536.252

**А. П. Шпак¹, Ю. П. Ладиков-Роев², П. П. Рабочий²,
Н. Н. Сальников², О. К. Черемных²**

¹Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, Київ

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
і Національного космічного агентства України, Київ

Исследование стационарных режимов в установке кристаллизации по методу Бриджмена

Досліджуються стаціонарні віссиметричні процеси тепло- та масопереносу у розплаві зразка в установці Бріджмена. Для випадку великих чисел Прандтля аналітично показана відсутність стаціонарного режиму через нестійкість отриманого стаціонарного рішення. Для скінчених чисел Прандтля проведено чисельний аналіз. Наводиться вигляд відповідних стаціонарних гідродинамічних та теплових полів.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы кристаллизации в условиях микрогравитации в последнее время являются объектом исследований на Международной космической станции. Экспериментальные исследования осуществляются, в частности, в установках кристаллизации по методу Бриджмена [5, 7, 8], где процесс кристаллизации осуществляется в цилиндрической ампуле, которая перемещается из зоны нагревателя в зону холодильника. (Схема установки изображена на рис. 1). При этом часть вещества находится в ампуле в виде расплава. Гидродинамические процессы, происходящие в расплаве, определяют поток примесей на фронт кристаллизации, что в конечном итоге определяет качество кристалла. Поэтому представляют практический интерес задачи исследования таких процессов, а также и механизмов управления ими для целенаправленного влияния на процесс кристаллизации.

В данной работе исследуется проблема осесимметричных стационарных конвективных и тепловых режимов в установках кристаллизации по методу Бриджмена.

© А. П. ШПАК, Ю. П. ЛАДИКОВ-РОЕВ, П. П. РАБОЧИЙ,
Н. Н. САЛЬНИКОВ, О. К. ЧЕРЕМНЫХ, 2003

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Считаем, что расплавленное вещество заполняет часть ампулы от верхнего теплоизолированного торца до фронта кристаллизации с температурой T_c . Ампула имеет форму цилиндра радиуса R_0 . Связем с ампулой цилиндрическую систему координат, начало которой поместим на оси ампулы на одном из торцов цилиндра, а ось z направим вдоль оси цилиндра. Считаем, что ампула находится в однородном поле силы тяжести, при этом ось ампулы z параллельна силе тяжести, но направлена противоположно ей. На боковой поверхности ампулы температура изменяется линейно от T_c до T_h , $T_c < T_h$. Вещество расплава считаем несжимаемым. Для удобства расчетов введем безразмерные переменные для длины, времени, скорости и температуры:

$$\begin{aligned} r &\longrightarrow \frac{r}{R_0}, & t &\longrightarrow \frac{tv}{R_0^2}, \\ v &\longrightarrow \frac{vR_0}{\nu}, & \theta &\longrightarrow \frac{T - T_c}{T_h - T_c}. \end{aligned}$$

В этих переменных уравнения Буссинеска [1, 3],

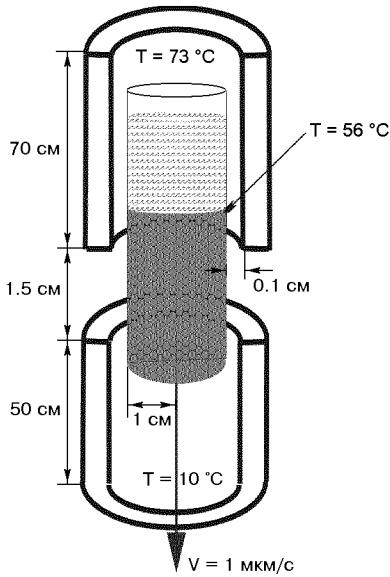


Рис. 1. Схема установки кристаллизации по методу Бриджмена

описывающие процессы тепло- и массопереноса в расплаве, имеют вид

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{v} = - \text{grad} \left(\frac{p}{\rho_0} + \frac{v^2}{2} \right) + \text{Gr} \theta \gamma + \Delta \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} \theta = \frac{1}{\text{Pr}} \Delta \theta, \quad (2)$$

$$\text{div} \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

где ρ_0 — плотность расплава, соответствующая температуре $\bar{T} = (T_c + T_h)/2$, p — отклонение давления от гидростатического, $\text{Gr} = g \beta R_0^3 (T_h - T_c)/v^2$ — число Грасгофа, $\beta = -(1/\rho_0)/(\partial \rho / \partial T)$ — коэффициент термического расширения жидкости, g — ускорение свободного падения, v — кинематическая вязкость расплава, $\text{Pr} = v/a$ — число Прандтля, a — коэффициент температуропроводности.

Для гидродинамической скорости расплава справедливы условия «прилипания» к поверхности ампулы:

$$\mathbf{v}|_{r=1} = \mathbf{v}|_{z=0} = \mathbf{v}|_{z=L_0} = 0, \quad (4)$$

где L_0 — безразмерная высота ампулы ($L_0 \rightarrow L_0/R_0$).

Границные условия для температуры θ имеют вид

$$\theta|_{z=0} = 0,$$

$$(\text{grad} \theta)|_{z=L_0} = \frac{\partial \theta}{\partial z}|_{z=L_0} = 0, \quad (5)$$

$$\theta|_{r=1} = m \frac{z}{L},$$

где $L = mL_0$, $m = \text{const.}$

В силу осевой симметрии для составляющих скорости v_r и v_z , а также для радиального градиента температуры $\text{grad}_r \theta$ должны выполняться равенства

$$v_r|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial v_z}{\partial r}|_{r=0} = 0, \quad \text{grad}_r \theta|_{r=0} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, задача нахождения стационарных решений свелась к решению уравнений теплопроводности (1)–(3) с граничными условиями (4)–(6).

ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Для рассматриваемого двумерного случая осесимметричных движений удовлетворяющие уравнению (3) составляющие скорости v_r и v_z могут быть представлены в следующем виде:

$$v_r = - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (7)$$

где $\psi(r, z, t)$ — функция тока. Из граничных условий для скорости (4) и (6) следует, что на поверхности ампулы Γ функция $\psi(t, r, z)$ постоянна. Поэтому без ограничения общности можно положить $\psi|_{\Gamma} = 0$.

Подставляя (7) в уравнение теплопроводности (2), получаем

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{r} [\psi, \theta] = \epsilon^2 \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right], \quad (8)$$

где

$$[\psi, \theta] = \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial r}$$

— скобка Пуассона, $\epsilon = 1/\sqrt{\text{Pr}}$. Для нахождения решения уравнений (1) и (8) ограничимся рассмотрением случая больших чисел Прандтля, когда $\epsilon \ll 1$. Этот случай соответствует малому значению коэффициента температуропроводности a , что в свою очередь означает, что теплообмен во внутренней части объема ампулы осуществляется посредством конвекции. И только в пограничном слое, где скорости расплава малы, доминирующую роль играет процесс диффузии тепла. Для получения приближенного стационарного решения уравнения (8) воспользуемся методом возмущений. Разлагая (8) в ряд по ϵ в основном объеме и в пограничном слое и сшивая найденные в этих областях решения, получаем, что приближенное решение для температуры, удовлетворяющее граничным условиям (5), (6), имеет вид

$$\theta = B(t)F(r, z), \quad (9)$$

где

$$F(r, z) = \varphi + M(r) \left[1 + \frac{1}{\varepsilon} (r - 1) \right] \frac{z}{L}, \quad (10)$$

$$\varphi(r, z) = r^2(1 - r^2) \sin^2 \frac{\pi z}{L},$$

$$M(r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq 1 - \varepsilon, \\ m, & 1 - \varepsilon \leq r \leq 1, \end{cases}$$

а функция $B(t)$ произвольна.

Легко убедиться, что согласованное с (9) решение для скорости, удовлетворяющее граничным условиям, имеет вид

$$\mathbf{v} = A(t)\mathbf{u}, \quad (11)$$

где компоненты u_r и u_z вектора $\mathbf{u} = (u_r, 0, u_z)$ определяются следующими выражениями:

$$u_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r}. \quad (12)$$

Для нахождения неизвестных функций $A(t)$ и $B(t)$ используем метод Бубнова—Галеркина. Следуя этому методу (см. подробнее [1, 6]), для функций $A(t)$ и $B(t)$ получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} S \frac{dB}{dt} + A(t)B(t) - \varepsilon^2 B(t)Q = 0, \\ U \frac{dA}{dt} + B(t)\text{Gr}W - A(t)Y = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$S = \int_V F^2 r dr dz = \frac{L}{3360} - \frac{m^2 L}{9} \varepsilon + O(\varepsilon^2),$$

$$\begin{aligned} X = \int_V \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial F}{\partial r} \right) Fr dr dz = \\ = -\frac{m^2}{120} \varepsilon^2 + O(\varepsilon^4), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q = \int_V F \Delta F r dr dz = \\ = \frac{m^2 L}{6} - \frac{L}{280} - \frac{\pi^2}{2520 L} + \frac{m L}{4} \varepsilon + O(\varepsilon^2), \end{aligned}$$

$$U = \int_V \frac{1}{r^2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz = \frac{\pi^2}{560 L} + \frac{L}{40},$$

$$W = \int_V (\text{rot} \mathbf{u})^2 r dr dz = \frac{\pi^2}{15 L} + \frac{\pi^4}{140 L^3} + \frac{3 L}{4},$$

$$Y = \int_V \frac{\partial \varphi}{\partial r} F r dr dz = -\frac{m L}{12} \varepsilon^2 + O(\varepsilon^3). \quad (14)$$

Используя обозначения

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{Y}{U} = -\frac{140 m L^2}{3 \pi^2 + 42 L^2} \varepsilon^2, \\ a_2 &= \frac{W}{U} = \frac{112 \pi^2 L^2 + 12 \pi^4 + 1260 L^4}{3 \pi^2 L^2 + 42 L^4}, \\ b_1 &= \frac{X}{S} = -\frac{84 m^2 \varepsilon^3}{3 L - 1120 m^2 L \varepsilon}, \\ b_2 &= \frac{Q}{S} = \frac{420 m^2 L^2 - 9 L^2 - \pi^2 + 630 m L \varepsilon}{0.75 L^2 - 280 m^2 L^2 \varepsilon}, \end{aligned} \quad (15)$$

Перепишем систему (13) в виде

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} + b_1 A(t)B(t) - \varepsilon^2 b_2 B(t) &= 0, \\ \frac{dA}{dt} - a_1 \text{Gr}B(t) - a_2 A(t) &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Легко видеть, что система (16) имеет искомое стационарное решение при

$$A_0 = \varepsilon^2 \frac{b_2}{b_1}, \quad B_0 = -\varepsilon^2 \frac{b_2 a_2}{b_1 a_1 \text{Gr}}. \quad (17)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Исследуем найденное решение на устойчивость, используя метод малых возмущений. Рассмотрим малые возмущения стационарного состояния в виде

$$\begin{aligned} B(t) &= B_0 + x_0 e^{\lambda t}, \\ A(t) &= A_0 + y_0 e^{\lambda t}, \end{aligned} \quad (18)$$

где x_0 и y_0 — малые величины. Подставляя (18) в (16) и линеаризуя полученные уравнения по малости x_0 и y_0 , получаем

$$\begin{aligned} \lambda x_0 + b_1 (A_0 x_0 + B_0 y_0) - \varepsilon^2 b_2 x_0 &= 0, \\ \lambda y_0 - a_1 \text{Gr}x_0 - a_2 y_0 &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Эта система будет иметь нетривиальное решение x_0 и y_0 , если ее определитель равен нулю. Откуда находим

$$\lambda_{1,2} = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 + 4 \varepsilon^2 a_2 b_2}}{2}. \quad (20)$$

Из уравнения (20) видно, что одно из значений λ будет положительно при любых параметрах системы. Последнее означает, что найденное стационарное решение (9), (11), (17) системы (16) неустойчиво. При этом, как следует из (15), с увеличением m (т. е. с увеличением градиента температуры на боковой границе ампулы) λ увеличивается, и неустойчивость развивается быстрее.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Полученные в предыдущих двух разделах результаты справедливы при больших числах Прандтля. С точки зрения практических приложений, однако, более интересен случай $\text{Pr} \leq 1$, который соответствует большинству используемых веществ в установках кристаллизации по методу Бриджмена. Поскольку получение аналитических результатов при таких значениях числа Прандтля затруднительно, то в данном разделе приводятся результаты числен-

ных расчетов уравнений массо- и теплопереноса в расплаве. Для получения численного решения перейдем в системе (1)–(3) к переменным «вихрь (ω) — функция тока (ψ)», [2], в которых указанная система имеет вид

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{1}{r} \{\psi, \omega\} = \frac{1}{r} \text{Gr} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \Delta \omega, \quad (21)$$

$$\omega = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}, \quad (22)$$

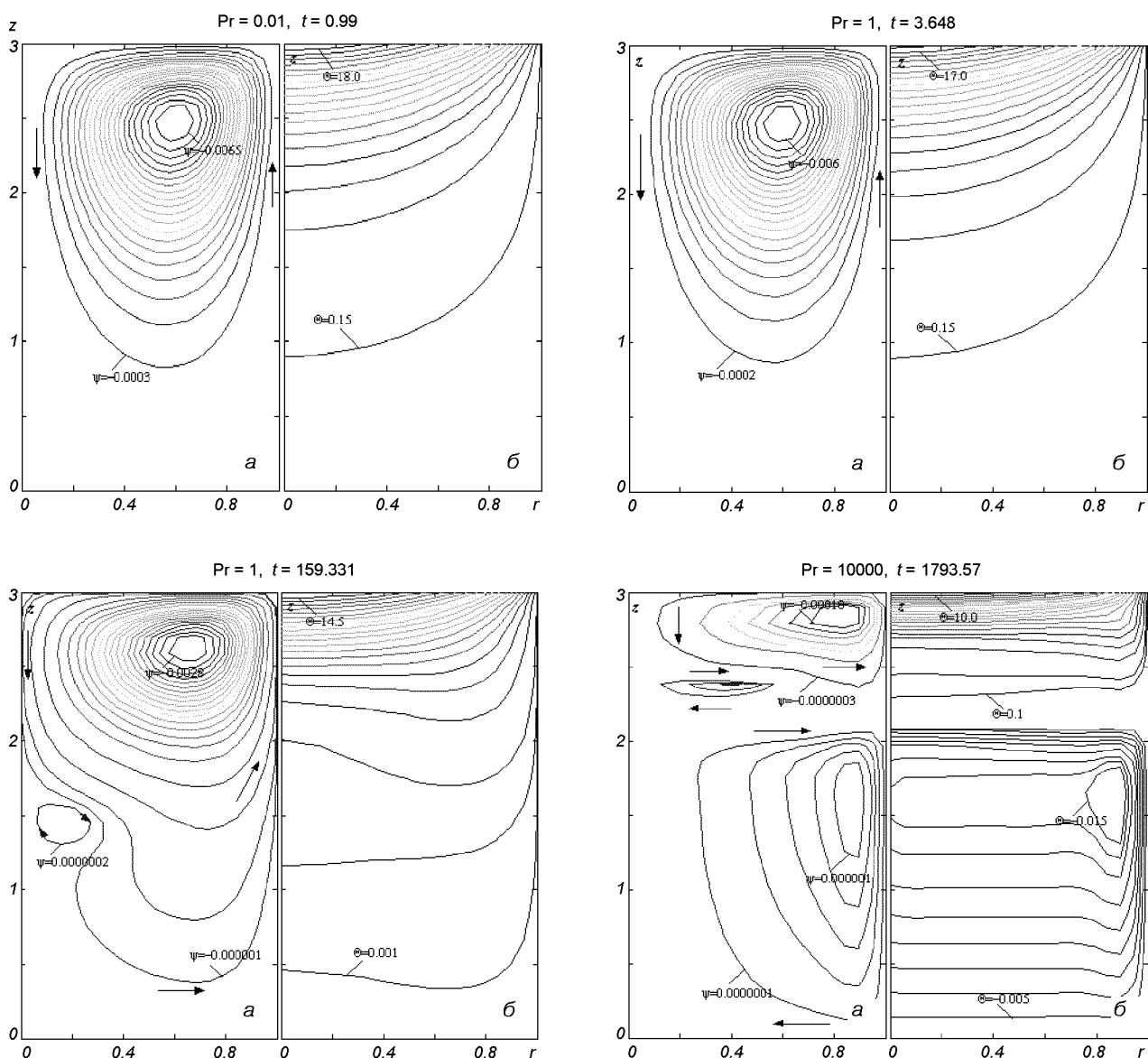


Рис. 2 Стационарные распределения линий тока (а) и изотерм (б) при различных значениях числа Pr

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{r} [\psi, \theta] = \frac{1}{Pr} \Delta \theta, \quad (23)$$

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Границные условия (4)–(6) в новых переменных примут вид

$r = 0$:

$$\omega = 0, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0;$$

$r = 1$:

$$\omega = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2}, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0, \quad \theta = m \frac{Z}{L},$$

$z = 0$:

$$\omega = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0, \quad \theta = 0;$$

$z = L$:

$$\omega = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0.$$

На рис. 2 представлены стационарные распределения линий тока и изотерм при различных значениях числа Pr , на которые выходят с течением времени указанные величины, полученные путем численного решения уравнений (21)–(23) с граничными условиями (24). Уравнения решались методом установления с использованием неявной продольно-поперечной схемы [4], построенной на равномерной сетке. В качестве критерия установления стационарного режима использовалось условие

$$\max_{ij} |\xi_{ij}^{n+1} - \xi_{ij}^n| < \eta,$$

где $\xi = [\psi, \theta, \omega]$, n — номер временного слоя, η — малая величина, которую можно варьировать (при расчетах использовалось значение $\eta = 10^{-10}$). Для аппроксимации уравнений системы разностными уравнениями входящие в нее пространственные производные заменялись центральными, а производные по времени — правыми разностными производными. Решение системы разностных уравнений на каждом временном слое находилось методом прогонки. Расчеты проводились для следующих интервалов значений безразмерных параметров:

$$10 < Gr < 10^6, \quad 10^{-2} < Pr < 10^4.$$

Результаты численного решения показывают, что поля гидродинамических скоростей и температурные поля в стационарном режиме определяются

величиной Pr , а величина Gr влияет только на интенсивность стационарных конвективных течений. При достаточно больших числах Прандтля (конкретное значение Pr определяется величиной числа Грасгофа) численные стационарные решения получить не удается. Это, по-видимому, объясняется быстро развивающейся неустойчивостью таких решений, что хорошо согласуется с полученным выше аналитическим результатом. При этом с увеличением Gr величина Pr , при которой перестает достигаться стационарный режим, смещается в сторону меньших чисел Прандтля. Как видно из рисунков, при больших числах Прандтля форма изотерм подобна форме линий тока, что оправдывает выбор ранее исследовавшихся аналитически пробных функций (см. (12)). При фиксированном Gr время установления стационарного режима с увеличением числа Прандтля увеличивается.

На всех рисунках слева приведены линии тока, а справа — изотермы, $\Theta = ((mz)/L - \theta)Gr$, t — безразмерное время установления стационарного режима, $Gr = 100$, $L = 3.0$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, величина числа Прандтля определяет тепло- и массоперенос в расплавленном веществе в установке Бриджмена. В некоторых случаях (при $Pr \gg 1$) в расплаве не может установиться стационарный режим. Этот результат, по нашему мнению, является неожиданным и требует дальнейшего экспериментального и теоретического исследования.

Авторы благодарят В. М. Кунцевича и О. П. Федорова за плодотворное обсуждение результатов работы. Статья выполнена в рамках контракта «МКС—Анализ» с Национальным космическим агентством Украины.

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. — М.: Наука, 1972.—392 с.
2. Долгих Г. А., Феонычев А. И. Численное исследование процессов тепло- и массообмена при направленной кристаллизации в условиях невесомости // Проблемы механики и теплообмена в космической технике. — М.: Машиностроение, 1982.
3. Земсков В. С. Новые научные представления о процессах, сопровождающих направленную кристаллизацию расплавов, — итог экспериментов по выращиванию кристаллов полупроводников на космических аппаратах // Сб. тр. VII Российской симп. «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем» (Москва, 11–14 апреля 2000 г.). — М.: ИПМ РАН, 2001.—С. 34—51.

4. Самарский А. А.. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977.
5. Современная кристаллография: В 4-х томах. Том 3. Образование кристаллов / Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Богдарасов Х. С. и др. — М.: Наука, 1980.—408 с.
6. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. — М.: Мир.—1988.—352 с.
7. Шпак А. П., Федоров О. П., Берсудский Е. И., Живолуб Е. Л. Некоторые проблемы исследования процессов направленного затвердевания в условиях микрогравитации(создание установки МОРФОС) // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 19—27.
8. Flemings M. Solidification Processing. — N. Y., 1974.—354 p.

THE INVESTIGATION OF STATIONARY REGIMES
IN A CRYSTALLIZATION SETUP WITH THE USE
OF THE BRIDGEMAN METHOD

A. P. Shpak, Yu. P. Ladikov-Roev, P. P. Rabochii,
N. N. Salnikov, and O. K. Cheremnykh

Some stationary axisymmetric processes of heat and mass transfer in a melt in the Bridgeman crystallization setup are investigated. The absence of stationary regime due to the instability of the stationary solution obtained was shown for large Prandtl numbers. For infinitesimal Prandtl numbers, a numerical analysis was made. The view of the corresponding stationary fluid and heat fields is presented.

УДК 621.315.592

Б. Е. Патон¹, Е. А. Аснис¹, С. П. Заболотин¹, П. И. Баранский², В. М. Бабич²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, Київ

²Інститут фізики напівпровідників Національної академії наук України, Київ

Получение сверхчистых объемных материалов полупроводниковых в условиях космического вакуума

Наводяться матеріали з технологічних експериментів направлених на отримання надчистих об'ємних напівпровідникових матеріалів в умовах космічного вакууму методом електронно-променевої зонної плавки за допомогою молекулярного екрану і комбінованого способу плавки — поєднання зонної плавки з процесом електропереносу.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с Институтом физики полупроводников НАН Украины проводит исследования, направленные на выяснение возможностей получения объемных совершенных сверхчистых полупроводниковых монокристаллов кремния в условиях микрогравитации.

Ежегодно в мире производится около 9000 тонн монокристаллов кремния. Из них 80 % мирового производства потребляет микроэлектроника, для которой этот материал был и несомненно останется на протяжении нескольких ближайших десятилетий наиболее употребительным.

Кроме того, кремний является тем материалом, структура и электрофизические свойства которого доведены практически до высокого совершенства, и поэтому сравнение структуры и электрофизическими свойствами, полученных в наземных и космических условиях, позволит установить влияние последних на его совершенство.

Актуальность глубокой очистки полупроводниковых материалов в связи с переходом прикладной электроники к использованию наноструктур и функциональных элементов микроэлектроники субмикронных размеров будет возрастать, что, несомненно, ставит эту проблему в разряд наиболее приоритетных не только для полупроводникового материаловедения, но и для твердотельной электроники в целом.

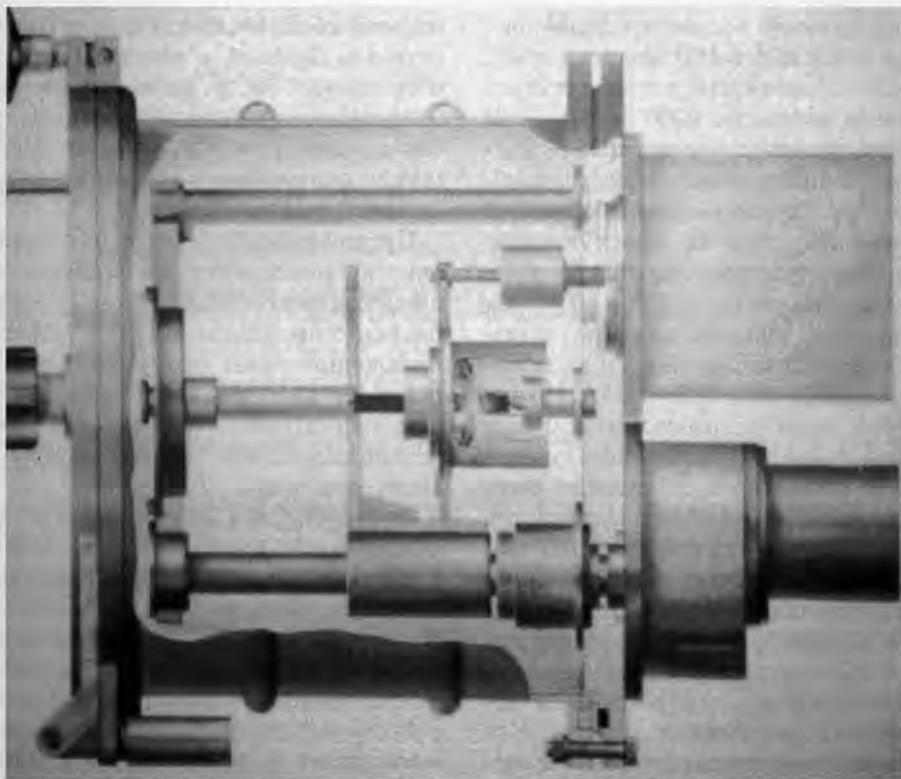
В настоящее время чистота кремния по легирующим примесям доведена до 10^{10} ат/см³, при этом содержание сопутствующих примесей, в т.ч. кислорода в кристаллах, выращенных по методу Чохральского или зонной плавкой, доходит до 10^{17} ат/см³.

Весьма актуальной является глубокая очистка кристаллов кремния, особенно от кислорода при использовании его как радиационностойкого материала, в частности для создания высокоэффективных счетчиков ядерных излучений, солнечных батарей, различных расположенных на внешней поверхности станции приборов, подвергающихся жесткому облучению частицами высоких энергий и т. д.

Наличие кислорода в кремнии уменьшает быстродействие приборов и служит источником невоспроизводимости параметров таких приборов, как импульсные и переключающие диоды, СВЧ-диоды и др.

Повышение чистоты кремния по кислороду позволило бы повысить КПД солнечных элементов на 10—12 %. При снижении содержания кислорода удалось бы значительно улучшить разрешение кремниевых счетчиков заряженных частиц и т. п.

Необходимо отметить, что монокристаллы (даже небольшие по размерам), но обладающие особо высокими показателями по чистоте и структурному совершенству, найдут самое широкое применение, например для получения легирующих материалов и исходных компонентов, предназначенных для син-



Рабочий блок с вакуумной камерой экспериментальной полетной установки для электронно-лучевой бестигельной зонной плавки

теза сложных полупроводниковых соединений, если эти компоненты не обладают высокой летучестью в вакууме. В деле стандартизации и прецизионной метрологии материалы сверхвысокой чистоты в строго фиксированных внешних условиях могут в перспективе обеспечить надежно обоснованное эталонирование наиболее важных параметров полупроводников и других актуальных и широко употребляемых материалов электронной техники.

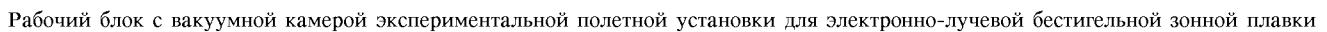
Такие материалы окажутся незаменимыми там, где потребуются их небольшие объемы, но требование к их чистоте будут предъявлены предельно высокие.

Для проведения исследований в условиях микрогравитации нами разрабатывается метод бестигельной электронно-лучевой зонной плавки, который является весьма перспективным для указанных целей.

Расплавленная зона образуется за счет бомбардировки материала дисковым пучком электронов, который формируется электронно-лучевым нагревателем, перемещающимся вдоль продольной оси образца (плавающая зона).

На рисунке показан рабочий блок с вакуумной камерой экспериментальной полетной установки для электронно-лучевой бестигельной зонной плавки.

Указанный метод позволяет наиболее полно использовать главные отличительные особенности космоса — микрогравитацию и космический вакуум, в т. ч. и сверхглубокий при выведении вакуум-проводка от плавильной установки в аэродинамический след за молекулярным экраном. Пилотируемые космические станции летают на орbitах 250—400 км от поверхности Земли. Исследования показали, что на указанных орбитах давление составляет в среднем 10^{-6} мм рт.ст., при этом содержание молекул газов, в частности молекулярного и атомарного кислорода (атмосфера космоса отличается большим его количеством) $10^{14}—10^{15}$ м⁻³. Космические корабли перемещаются с большими скоростями. При этом перед передней поверхностью объекта образуется относительно небольшой уплотненный слой, в котором давление повышается на 3–4 порядка по сравнению с атмосферой на этих орбитах, а за кораблем давление снижается. Молекулярный экран представляет собой диск со специально обработанной поверхностью, расположенный на расстоянии нескольких десятков метров от поверхности станции. С внутренней его стороны давление снижается на несколько порядков и составляет $10^{-10}—10^{-12}$ мм рт. ст. При этом содержание кислорода,



Рабочий блок с вакуумной камерой экспериментальной полетной установки для электронно-лучевой бестигельной зонной плавки

теза сложных полупроводниковых соединений, если эти компоненты не обладают высокой летучестью в вакууме. В деле стандартизации и прецизионной метрологии материалы сверхвысокой чистоты в строго фиксированных внешних условиях могут в перспективе обеспечить надежно обоснованное эталонирование наиболее важных параметров полупроводников и других актуальных и широко употребляемых материалов электронной техники.

Такие материалы окажутся незаменимыми там, где потребуются их небольшие объемы, но требование к их чистоте будут предъявлены предельно высокие.

Для проведения исследований в условиях микрогравитации нами разрабатывается метод бестигельной электронно-лучевой зонной плавки, который является весьма перспективным для указанных целей.

Расплавленная зона образуется за счет бомбардировки материала дисковым пучком электронов, который формируется электронно-лучевым нагревателем, перемещающимся вдоль продольной оси образца (плавающая зона).

На рисунке показан рабочий блок с вакуумной камерой экспериментальной полетной установки для электронно-лучевой бестигельной зонной плавки.

Указанный метод позволяет наиболее полно использовать главные отличительные особенности космоса — микрогравитацию и космический вакуум, в т. ч. и сверхглубокий при выведении вакуум-проводка от плавильной установки в аэродинамический след за молекулярным экраном. Пилотируемые космические станции летают на орбитах 250—400 км от поверхности Земли. Исследования показали, что на указанных орbitах давление составляет в среднем 10^{-6} мм рт.ст., при этом содержание молекул газов, в частности молекулярного и атомарного кислорода (атмосфера космоса отличается большим его количеством) 10^{14} — 10^{15} м⁻³. Космические корабли перемещаются с большими скоростями. При этом перед передней поверхностью объекта образуется относительно небольшой уплотненный слой, в котором давление повышается на 3–4 порядка по сравнению с атмосферой на этих орбитах, а за кораблем давление снижается. Молекулярный экран представляет собой диск со специально обработанной поверхностью, расположенный на расстоянии нескольких десятков метров от поверхности станции. С внутренней его стороны давление снижается на несколько порядков и составляет 10^{-10} — 10^{-12} мм рт. ст. При этом содержание кислорода,

являющегося в ряде случаев весьма вредной примесью для кремния, составляет 100 молекул в м^3 , т. е. снижается на 12 — 13 порядков и соответствует содержанию этих газов на высоте 6000 км [1, 2]. В земных условиях для технологических целей получить такой вакуум не представляется возможным. Как показали расчеты, в случае вывода вакуумпроводы в аэродинамический след за молекулярным экраном в плавильном пространстве можно получить сверхглубокий вакуум — 10^{-10} — 10^{-11} мм рт.ст., что вписывается в границы вакуума, которые обеспечивают аэродинамический след за молекулярным экраном.

В настоящее время нами разработаны научные подходы и проведены расчеты для создания вакуумпроводы. Диаметр вакуумпровода должен быть не менее 0.2 м, так как при более малом диаметре резко снижается скорость откачки, и глубокий вакуум в камере нельзя будет достичь. Вакуумпровод должен быть изготовлен из нержавеющей трубы с полированной внутренней поверхностью для улучшения условий газоотделения. Камеру и вакуумпровод необходимо оснастить вакуумными затворами для выравнивания давления в камере и за бортом с последующей транспортировкой в камеру сверхглубокого вакуума. Камера и вакуумпровод также должны быть снабжены устройством, которое даст возможность продуть систему сверхчистым гелием при откачке. Гелий — это «метла», которая эффективно сметает со стенок камеры и вакуумпровода адсорбированные газы и молекулы влаги.

Проведенные исследования методом ИК-спектроскопии, холовских измерений и электронного paramagnитного резонанса монокристаллов кремния, полученных методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки показали, что даже при плавке в вакууме — 10^{-5} мм рт. ст. содержание кислорода и фосфора снижается соответственно на 2 и на 1 порядок.

Полученные данные свидетельствуют о хорошей перспективе очистки кремния от газов и других примесей с высокой упругостью пара при плавке в сверхглубоком вакууме, обеспечиваемым с помощью молекулярного экрана.

По-видимому, применяя сверхглубокий вакуум, возможно будет провести очистку кремния от кислорода и других газовых примесей, в частности азота, водорода и аргона, в атмосфере которых кристаллы выращиваются в земных условиях.

Подбирая наиболее подходящие режимы выращивания монокристаллов кремния с помощью электронно-лучевой бестигельной зонной плавки, удалось показать, что в условиях электронно-лучевого переплава (при соблюдении надлежащих режимов

плавки) обеспечивается фронт кристаллизации, достаточно близкий к плоскому, что в свою очередь обеспечивает более равномерное тепловое поле и, соответственно, равномерное распределение примесей поперек кристалла и в его объеме, что способствует получению материала с высокими электрофизическими свойствами.

Предполагается также исследовать в космосе очистку монокристаллов кремния с помощью комбинированного способа плавки — сочетания зонной плавки с процессом электропереноса. Очистка расплавленной зоны происходит как за счет зонной перекристаллизации, так и вывода ионов примесей при наложении электрического поля на образец при пропускании через него тока в направлении роста кристалла.

Этот механизм работает даже в условиях, когда коэффициент сегрегации примесей приближается к единице, как, например, примеси бора в кремнии.

Проведенные расчеты и наземные исследования показали, что при применении этого процесса содержание примеси бора, коэффициент распределения которого $K = 0.8$, снижается примерно на 10% .

В связи с отсутствием в условиях микрогравитации тепловой конвекции эффективность данного метода очистки должна значительно увеличиться. В настоящее время отрабатываются наземные эксперименты.

Во всех случаях при создании физико-технических основ технологического процесса зонной плавки кремния и других полупроводниковых материалов, на наш взгляд, наиболее эффективные результаты могут быть достигнуты при сочетании использования надежно контролируемой микрогравитации и сверхглубокого вакуума.

1. Бержатый В. И., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И. и др. Перспективы реализации вакуумных технологий в условиях орбитального полета // Автоматическая сварка.— 1999.—№ 10.—С. 108—116.
2. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998.—180 с.

DERIVING ULTRAPURE THREE-DIMENSIONAL SEMICONDUCTOR MATERIALS UNDER SPACE VACUUM CONDITIONS

B. Ye. Paton, Ye. A. Asnis, S. P. Zabolotin,
P. I. Baranskii, and V. M. Babich

We give some results of technological experiments aimed at producing ultrapure three-dimensional semiconductor materials under space vacuum conditions by the method of electron beam zone melting with the use of molecular shield and integrated melting process, which is a combination of zone melting with the electric transfer process.

УДК 539.4.385:620.193.2

**Р. В. Гаврилов, Ю. А. Похил, Л. Ф. Яковенко,
Е. Н. Алексенко, В. А. Лотоцкая**

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з кріогенної техніки
Фізико-технічного інституту низких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

**Исследование
космического
долговечность
космического
полета.
Космический
влияния
пространства
материалов
в
эксперимент
факторов
на
циклическую
условиях
реального
«Пента–Усталость»**

Розглянуто стан виконання робіт з підготовки та проведення одного з першочергових спільних українсько-російських космічних експериментів на російському сегменті МКС — «Пента-Втома». Експеримент спрямовано на дослідження впливу реальних факторів космосу на опір втомному руйнуванню конструкційних матеріалів КА, та на порівняння з результатами впливу факторів, що імітуються в наземних лабораторій умовах.

ВВЕДЕНИЕ

Проект «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС» включает в себя в качестве одного из приоритетных направлений исследования в области космического материаловедения и технологий. К числу первоочередных космических экспериментов (КЭ) в этом направлении, которые планируется провести на этапе развертывания МКС, относится и КЭ «Пента-Усталость» — «Исследование влияние ФКП на усталостные характеристики материалов в условиях реального космического полета с применением специализированного бортового оборудования». Головным постановщиком КЭ от Украины является Специальное конструкторско-технологическое бюро по криогенной технике Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины в кооперации с украинскими организациями ОАО НПК «Курс» и НПП «Хартрон-Аркос». С российской стороны в качестве постановщи-

ка КЭ выступает ЦНИИМАШ в содружестве с РКК «Энергия» и ЗАО «Композит- Тест».

Очевидно, что выбор и применение материалов для силовых конструкций элементов космических аппаратов (КА) определяется устойчивостью механических свойств (статических и динамических) этих материалов к воздействию факторов космического пространства (ФКП), таких как вакуум, электромагнитное излучение Солнца, мощные потоки корпускулярного излучения, низкие температуры, невесомость, микрометеоритные потоки, атомарный кислород и др.

Учет переменных нагрузок, действующих в процессе работы деталей и узлов механизмов, весьма важен, поскольку в 80 % случаев отказы и поломки механизмов при эксплуатации связаны с усталостным разрушением. Изделия космической техники, в особенности силовые элементы КА долговременного действия (орбитальных станций, космических систем многоразового использования), испытывают многократные вибрационные нагрузки при запусках и посадках, на орбите в процессе стыко-

вок и расстыковок с другими КА, при коррекции орбиты, при раскрытии солнечных батарей, при выполнении технологических экспериментов на борту, в результате жизнедеятельности экипажа. Для обеспечения надежности и долговечности космических аппаратов конструкционные материалы силовых элементов корпуса, антенн, солнечных батарей, манипуляторов и других узлов должны обладать не только высокими значениями удельной статической прочности, но и высоким сопротивлением усталостному разрушению. Существенным является то, что характеристики сопротивления усталостному разрушению материалов наиболее чувствительны к влиянию таких факторов, которые действуют в главной мере на поверхность материала и его приповерхностный слой (внешняя среда и температура, некоторые виды радиации, микрометеоритная эрозия, атомарный кислород), так как процесс усталостного разрушения в большинстве случаев начинается с поверхности с дальнейшим распространением вглубь материала. Поэтому состояние поверхности и приповерхностного слоя и протекающие в них структурные изменения в результате одновременного воздействия динамической закономеренной нагрузки и факторов окружающей среды во многом предопределяют характер сопротивления усталостному разрушению материалов.

Решению задачи получения достоверной информации о влиянии реальных ФКП на характеристики циклической прочности и долговечности конструкционных материалов при их испытаниях непосредственно в открытом космосе и посвящен эксперимент «Пента — Усталость».

Основные подходы и научно-техническая идеология серии летных экспериментов на борту РС МКС, объединенных общим шифром «Пента — Усталость», изложены ранее в работах [2, 8, 9]. Настоящая работа преследует цель более детального описания научно-технического наполнения данного КЭ, включая и результаты наземных имитационных исследований, являющихся физической базой для анализа и трактовки бортовых экспериментов.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КЭ «ПЕНТА — УСТАЛОСТЬ»

Эксперимент направлен на решение двух основных проблем:

- исследование влияния ФКП на характеристики сопротивления усталостному разрушению материалов непосредственно в открытом космосе и сопоставление этих данных с данными, полученными при имитации ФКП в лабораторных

условиях с целью установления степени их адекватности;

- длительное экспонирование образцов материалов в открытом космосе для послеполетных наземных испытаний с целью установления влияния реальных ФКП на характеристики их циклической прочности и долговечности.

В прикладном аспекте проведенные исследования дадут возможность оценить работоспособность конструкционных материалов в космических условиях по такой важной механической характеристике, как сопротивление усталости.

В научном отношении полученные результаты будут важны как для понимания механизмов воздействия отдельных внешних факторов и их совокупности, так и для развития представлений о процессе усталости в целом. Так, например, сравнивая результаты испытаний, проведенных на борту *in situ* и в послеполетных лабораторных экспериментах с экспонированными материалами, можно будет оценить не только влияние накопленной материалом дозы облучения на сопротивление усталости, но и ответить на принципиальный вопрос о том, в какой мере влияет на циклическую долговечность исследованных материалов одновременное совместное воздействие радиации, вакуума, многократного термоциклирования (с периодом вращения КА) и других факторов реального космического полета. Такая постановка вопроса оправдана тем, что наличие механических и термических напряжений стимулирует радиационные повреждения, препятствуя рекомбинации части радиационных дефектов, как это происходит в предварительно облученных материалах.

Программа КЭ «Пента — Усталость» предусматривает решение следующих задач.

- Проведение широких предварительных наземных лабораторных исследований сопротивления усталости материалов-претендентов с целью отбора объектов исследования и определения рабочих параметров полетного эксперимента, включая дополнительные исследования материалов.
- Создание экспериментальной бортовой установки (ЭПУ) «Цикл-1» для циклического нагружения образцов.
- Проведение предварительных наземных лабораторных испытаний отобранных материалов на аналоге бортовой установки с целью отработки методики проведения КЭ.
- Проведение КЭ «ПЕНТА — УСТАЛОСТЬ» на борту МКС с целью получения характеристик сопротивления усталости материалов в условиях реального космического полета. Объекты

- исследования — образцы материалов корпуса, ферм и солнечных батарей.
- Проведение параллельных с КЭ наземных исследований на аналоге бортовой установки, помещенной в наземный имитатор основных ФКП, в режиме, аналогичном бортовому эксперименту, с целью установления адекватности наземной имитации реальных ФКП.
 - Длительное экспонирование на борту МКС образцов в открытом космосе и последующее возвращение их на Землю для послеполетных испытаний с целью выяснения влияния длительного пребывания материалов в космосе на характеристики сопротивления материалов усталостному разрушению.
 - Диагностика состояния поверхности и изломов образцов материалов, возвращенных на Землю после КЭ, обработка результатов исследований и установление степени адекватности усталостных характеристик материалов, полученных в условиях космического полета и в условиях наземной имитации ФКП, выработка рекомендаций по отбору конструкционных материалов, работоспособных в условиях воздействия ФКП.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КЭ

Для исследования влияния ФКП на сопротивление усталости металлов и полимерных материалов будет разработана и создана установка «ЦИКЛ-1», размещаемая на РС МКС. Установка позволяет одновременно в идентичных внешних условиях открытого космоса испытывать партию плоских консольных образцов (8 шт.) одного материала на циклический изгиб.

Установка состоит из механической части, системы управления и контрольно-измерительной аппаратуры и платформы для экспонирования образцов в открытом космосе. Механическая часть, собранная в корпусе многопозиционного испытательного блока, платформа для экспонирования и датчики регистрации ФКП размещаются на внешней поверхности РС МКС. Остальная часть установки, включающая в себя системы измерения параметров, управления режимами, регистрации и преобразования данных, изготовленная в виде отдельного блока, размещается в зоне научной аппаратуры герметичного отсека РС МКС.

Космонавт-оператор производит общее включение установки. Далее установка работает в автоматическом режиме (замеры параметров эксперимента и выключение после поломки последнего образца или при достижении базового числа циклов).

Космонавт-оператор производит замену отработавшего блока циклического нагружения и съем подвергшегося заданной экспозиции блока экспонирования образцов.

Общая схема космического эксперимента для каждого исследуемого материала предусматривает как бортовые (циклические испытания и экспонирование), так и наземные эксперименты: на бортовой установке «ЦИКЛ-1» подвергается испытаниям на усталость в условиях открытого космоса три партии образцов по 8 шт. различных конструкционных материалов. Результатом таких испытаний будет получение циклической долговечности в условиях воздействия ФКП в ходе испытаний; другие партии образцов подвергаются предварительному экспонированию на платформе бортовой установки «ЦИКЛ-1» в открытом космосе с последующим возвратом их на Землю для послеполетных наземных испытаний на циклическую долговечность; таким же испытаниям на усталость на идентичной установке будут подвергаться образцы исследуемых материалов в наземном имитаторе ФКП для оценки степени адекватности наземной имитации ФКП; сопоставление и анализ полученных по предложенной схеме результатов позволит достоверно решить задачи КЭ.

СОСТАВ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ КЭ «ПЕНТА-УСТАЛОСТЬ»

Научная аппаратура, разрабатываемая украинской стороной и обеспечивающая выполнение задач КЭ, состоит из экспериментальной полетной установки (ЭПУ) «Цикл-1» и комплекса наземного оборудования.

ЭПУ «Цикл-1» включает в себя:

- блоки циклического нагружения образцов БЦН-1А, БЦН-1Б и БЦН-1В;
- блок (платформа) экспонирования образцов БЭКС;
- блок управления, измерения и регистрации параметров БУ;
- соединительные кабели и элементы крепления.

Комплекс наземного оборудования включает в себя:

- лабораторный аналог установки «Цикл-1» — «Цикл-1А»;
- высоковакуумную лабораторную установку, в которой имитируется воздействие ФКП на циклически нагружаемые образцы — МУВКИ.

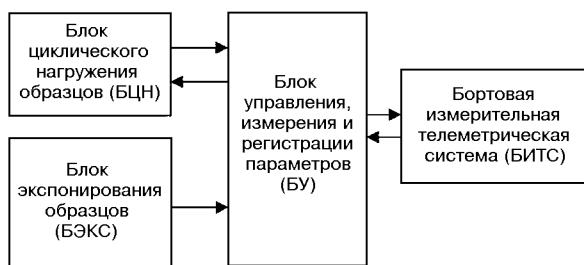
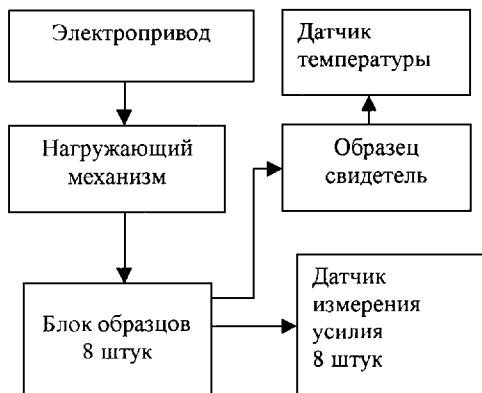


Рис. 1. Блок-схема ЭПУ «ЦИКЛ-1»



Блок-схема ЭПУ «ЦИКЛ-1» приведена на рис. 1 с указанием взаимных связей между блоками. БЦН и БЭКС размещаются на внешней поверхности РС МКС в зоне солнечного излучения с углом затенения не более 60°. БУ размещается в зоне научной аппаратуры герметичного отсека РС МКС.

Блок-схема БЦН-1 (А, Б и/или В) приведена на рис. 2. Блок позволяет одновременно в идентичных внешних условиях открытого космоса испытывать партию плоских консольных образцов (8 шт.) одного материала на циклический изгиб.

Блок-схема БЭКС и схема расположения образцов на платформе в развернутом виде приведены на рис. 3. Экспонируемые образцы закрепляются на автономной плоской платформе, которая представляет собой раскрываемый контейнер.

Блок схема БУ приведена на рис. 4. БУ предназначен для выдачи команд управления на БЦН, сбора и регистрации величин нагрузки, температуры и числа циклов нагружения образцов конструкционных материалов, установленных на БЦН, а также для регистрации температуры образцов, установленных на БЭКС.

В настоящее время подготовка КЭ «Пента — Усталость» проходит стадию эскизного проектирования и макетирования научной аппаратуры и

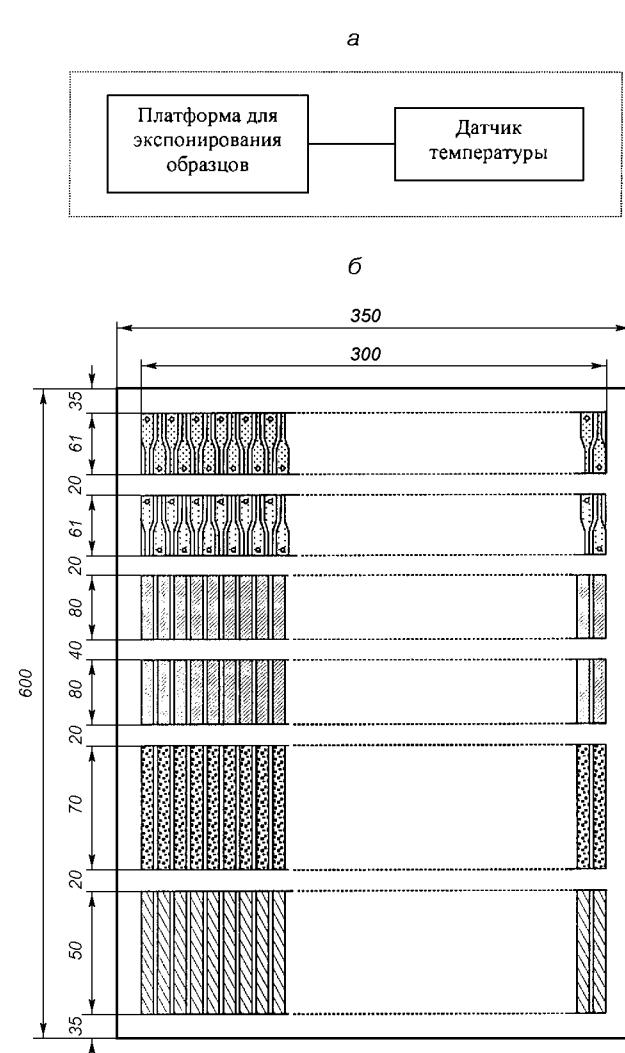


Рис. 3. Блок-схема блока экспонирования образцов ЭПУ «ЦИКЛ-1» (а) и схема расположения образцов на съемной платформе для экспонирования в развернутом состоянии (б)

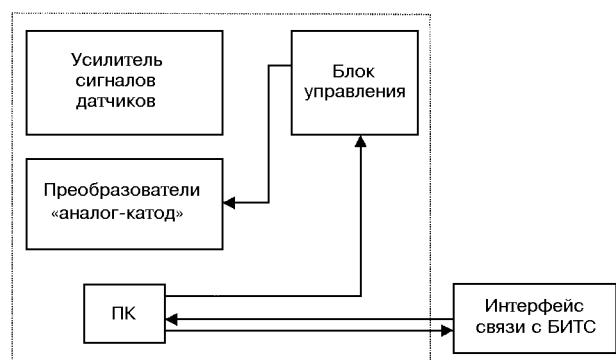


Рис. 4. Блок-схема блока управления, измерения и регистрации параметров установки «ЦИКЛ-1»

проведения наземных отборочных исследований характеристик сопротивления усталостному разрушению материалов-претендентов в условиях воздействия «искусственных» факторов космоса.

НАЗЕМНЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В СКТБ ФТИНТ НАН Украины разработана и создана лабораторно-испытательная база специализированного криогенного, вакуумного и имитационного испытательного и исследовательского оборудования различного назначения и созданы методики исследования и измерения комплекса физико-механических свойств в условиях наземной имитации как отдельных ФКП, так и совокупности основных факторов [1, 6].

Созданная лабораторно-испытательная база обеспечивает проведение разносторонних физических исследований, направленных на решение проблемы обеспечения работоспособности, надежности и долговечности широкого класса используемых в аэрокосмической технике конструкционных и функциональных материалов и покрытий в экстремальных условиях космического полета.

Комплексные исследования физико-механических свойств материалов и ответственных узлов космической техники, проводимые в СКТБ ФТИНТ НАНУ, в условиях, приближающихся к реальным, позволили сформулировать обоснованные физические критерии оценки и отбора характерных классов материалов, пригодных для использования в жестких условиях эксплуатации космических изделий. Эти критерии базируются на всестороннем анализе экспериментально установлен-

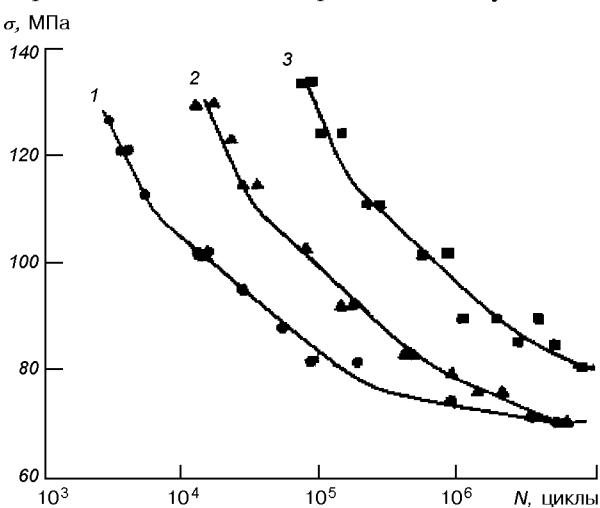


Рис. 5. Кривые усталости магниевого сплава MA21, полученные на воздухе (1) и в вакууме 10^{-6} торр при 293 К (2) и 11 К (3)

ной взаимосвязи широкого спектра внешних и внутренних факторов и на построении причинно-следственной цепочки: «предыстория — структурно-фазовое состояние — макроскопическое свойство — условия эксплуатации — применение» [6].

При отборе материалов-претендентов для КЭ «Пента — Усталость» непременно будут использованы результаты наземных систематических исследований влияния вакуума и низких температур (как основных нерадиационных факторов космического пространства) на сопротивление конструкционных материалов усталостному разрушению. Приведем наиболее характерные из них [3, 5, 7].

Влияние вакуума. Анализ результатов влияния вакуума на характеристики сопротивления усталости и циклической трещиностойкости металлов и сплавов, свидетельствует о положительном эффекте вакуума на эти характеристики практических всех металлических материалов.

На рис. 5, 6 показан характер влияния вакуума на кривые усталости и кинетические диаграммы усталостного разрушения металлических материалов. Видно, что циклическая долговечность магни-

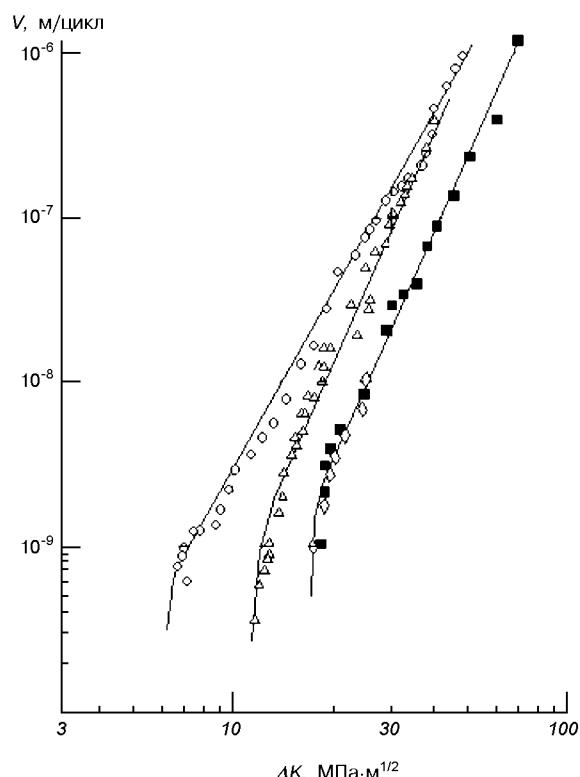


Рис. 6. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали 03Х20Н16АГ6, полученные на воздухе и в вакууме при различных температурах: кружки — воздух, 293 К; треугольники — вакуум, 293 К; ромбочки — вакуум, 93 К; квадратики — вакуум, 11 К

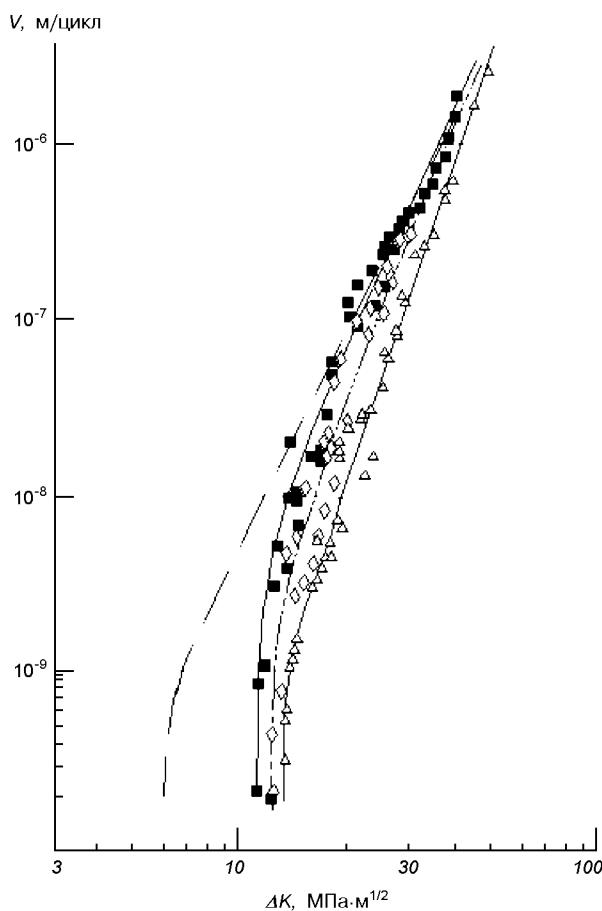


Рис. 7. Кинетические диаграммы усталостного разрушения титанового сплава BT5-1кт: штриховая линия — воздух, 293 К; треугольники — вакуум, 293 К; ромбики — вакуум, 93 К; квадратики — вакуум, 11 К

евого сплава MA21 в области ограниченной выносимости возрастает почти на порядок при переходе от испытаний на воздухе к испытаниям в вакууме (рис. 5). Изменяется также и кинетика роста усталостной трещины — для хромо-никель-марганцевой стали в вакууме заметно возрастает пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений и уменьшается скорость роста усталостной трещины при одинаковых значениях коэффициента интенсивности напряжений (рис. 6).

Показано, что улучшение характеристик усталостного разрушения в вакууме обусловлено более однородным распределением микропластической деформации в поверхностном слое металла вследствие изменения условий адсорбции атомов кислорода на свежеобразованных поверхностях ступенек скольжения.

Влияние низкой температуры на характеристики сопротивления усталости и циклической трещино-

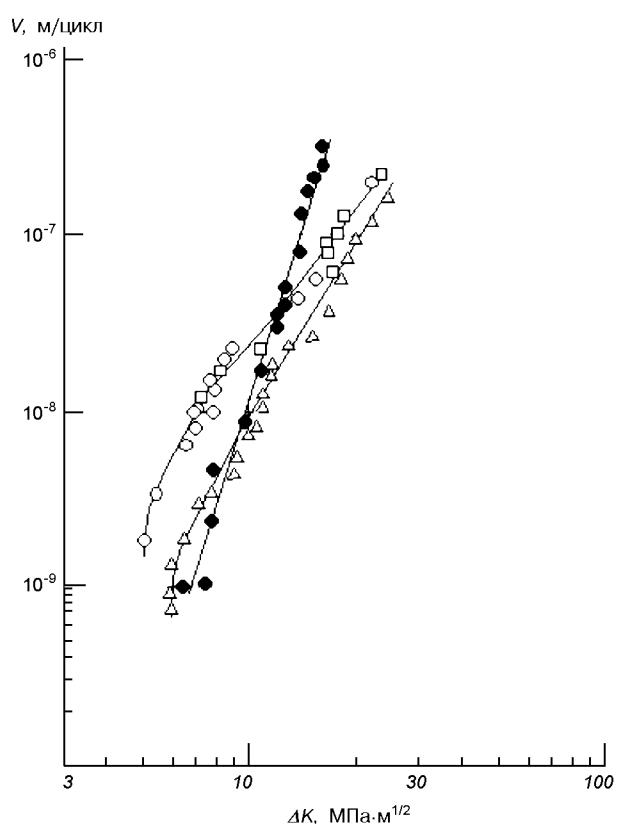


Рис. 8. Кинетические диаграммы усталостного разрушения титанового сплава BT22: кружки — воздух, 293 К; треугольники — вакуум, 293 К; точки — вакуум, 93 К

стойкости металлических материалов, в отличие от вакуума, неоднозначно и зависит от типа кристаллической решетки, структуры, уровня приложенных напряжений.

В сплавах на основе ГПУ-решетки (в основном титановые и магниевые сплавы) величина порогового коэффициента интенсивности напряжений обычно возрастает при понижении температуры, а скорость роста усталостной трещины в припороговой области уменьшается. Однако для высокоамплитудной области кинетической диаграммы усталостного разрушения понижение температуры может приводить как к уменьшению скорости роста усталостной трещины (рис. 7), так и к ее увеличению (рис. 8).

Наиболее приемлемыми конструкционными материалами с точки зрения низкотемпературной циклической трещиностойкости являются структурно-стабильные сплавы на основе ГЦК-решетки, которые характеризуются повышением сопротивления усталостному разрушению при понижении температуры независимо от уровня нагружения.

ВЫВОДЫ

В результате реализации КЭ «Пента — Усталость» будут получены следующие данные:

- усталостные характеристики (циклическая долговечность) нескольких конструкционных материалов, деформированных непосредственно в условиях воздействия факторов реального космического полета;
- усталостные характеристики (циклическая долговечность, кривые усталости) нескольких конструкционных материалов, деформированных в лабораторных условиях после их экспонирования в космосе;
- усталостные характеристики (циклическая долговечность, кривые усталости) исследуемых конструкционных материалов в наземных лабораторных условиях и в условиях имитируемого воздействия ФКП;
- установлена степень адекватности результатов усталостных испытаний материалов в условиях воздействия ФКП реального космического полета результатам, полученным в условиях имитируемого воздействия ФКП;
- разработаны экспериментально обоснованные рекомендации по дальнейшему применению конструкционных материалов, работоспособных в условиях воздействия ФКП.

1. Бондаренко С. И. Кислов А. М. Криогенная техника в космических условиях: разработки ФТИНТ НАН Украины // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 80—95.
2. Гаврилов Р. В., Еременко В. В., Похил Ю. А. Исследование физических характеристик материалов космического назначения при воздействии факторов космического пространства // Тр. V Междунар. конф. «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-5). — Харьков, 2002.— С. 85—95.
3. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А. Исследование материалов и

- процессов в условиях воздействия факторов космического пространства // Космічні дослідження в Україні 2000—2002. — Київ: КІТ, 2002.—С. 85—99.
4. Похил Ю. А. Конструкционные материалы для криогенно-вакуумной и аэрокосмической техники. Критерии отбора // Металлофиз. новейшие технологии.—1999.—21, № 6.—С. 3—8.
 5. Похил Ю. А., Яковенко Л. Ф., Алексенко Е. Н. Влияние вакуума на сопротивление усталостному разрушению конструкционных материалов // Тр. IV междунар. симп. «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-4). — Харьков, 2001.—Разд. 4.—С. 380—384.
 6. Arkhipov V. T., Cavrylov R. V., Lototskaya V. A., et. al. Development of on-board cryogenic facilities and ground-based test equipment for space experiments // Space research in Ukraine 1998—2000. — Kyiv: ADEF-Ukraine, 2001.—P. 87—92.
 7. Gavrilov R. V., Pokhyl Yu. A., et al. Investigations for influence of cosmic-space factors on physical properties of space-application functional materials by methods of accelerated simulation // Intern. Conf. ICFM-2001, Crimea, Ukraine, 2001.—P. 230.
 8. Eremenko V. V., Cavrylov R. V., Pokhyl Yu. A. Space Project «Penta» Complex // Космічна наука і технологія.—2000.—6, N 4.—С. 43.
 9. Pokhyl Yu. A., Yakovenko L. F., Aleksenko E. N., Lototskaya V. A. «Penta-Fatigue» Experiment, Influence of Space Factors on Fatigue Fractureresistance of Structural Materials // Космічна наука і технологія.—2000.—6, N 4.—C. 45.

INVESTIGATION OF SF INFLUENCE ON CYCLIC DURABILITY OF MATERIALS IN REAL SPACE FLIGHT CONDITIONS. SE “PENTA-FATIGUE”

R. V. Gavrilov, Yu. A. Pokhyl, L. F. Yakovenko,
E. N. Aleksenko, V. A. Lototskaya

We consider the state of works on preparation and realization of «Penta — Fatigue», one of high-priority joint Ukrainian-Russian space experiments on the Russian Segment of the ISS. The experiment is aimed at the investigation of influence of the real space factors on fracture fatigue resistance of structure materials of SV and at the comparison of the investigation results with results of influence of factors simulated in ground laboratory conditions.

УДК 536.42:621.891

М. А. Броновец¹, Г. Д. Гамуля², Ю. А. Еланский³,
Л. Т. Завгородний³, В. В. Скороход⁴, В. П. Солнцев⁴,
М. Н. Сурду⁵, В. Г. Тихий³, Г. А. Фролов⁴

¹Міжвідомча наукова рада з трибології при РАН, Мінпромнауки Росії і Спілці НДО, Москва

²Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки Фізико-технологічного інститута низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

³Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

⁴Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

⁵Державне науково-виробниче підприємство «Спецавтоматика», Київ

Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения космического эксперимента «Материал — Трение»

Розглянуто стан робіт з підготовки наукового устаткування для космічного експерименту «Материал — Трітя». Запропоновано методику і оцінено похибки виміру зносу пари тертя в умовах орбітального польоту з використанням тензометричних датчиків. Описана конструкція модульного блока і розглянуті варіанти компонування орбітального трибометра. Отримано експериментальні результати, що підтверджують високу зносостійкість і зниження зносу пари тертя з матеріалів з елементами самоорганізації при збільшенні швидкості ковзання в умовах вакууму.

ВВЕДЕНИЕ

В техническом задании, согласованном Российской, Украинской и Белорусской академиями наук, а также рядом предприятий и организаций этих стран, определены следующие цели проведения космического эксперимента (КЭ) «Материал — Трение»:

— установление влияния факторов космического пространства на коэффициенты трения и механизмы изнашивания антифрикционных и износостойких материалов;

— определение адекватности характеристик трения и изнашивания идентичных материалов по результатам их испытаний в условиях воздействия факторов космического пространства (ФКП) и наземных лабораториях;

— определение триботехнических характеристик новых антифрикционных материалов и покрытий.

Для достижения поставленных целей разрабатывается научная аппаратура, позволяющая провести испытания перспективных для космической техники материалов и покрытий в условиях воздействия ФКП и при их моделировании в наземной лаборатории. В процессе этих экспериментов будут установлены коэффициенты трения, закономерности изнашивания, состояния поверхностей трения, структурные изменения материалов, подвергшихся испытаниям, и определены показатели работоспособности материалов и покрытий для узлов трения космических аппаратов (КА).

Критериями полноты выполнения задач КЭ будут являться:

— определение триботехнических характеристик не менее 20 материалов различных классов для перспективной космической техники в условиях воздействия реального комплекса ФКП;

— установление адекватности характеристик

трения и изнашивания, полученных в наземных лабораториях и в ходе испытаний материалов в космическом пространстве.

— уточнение действующих методик испытаний материалов на трение и износ и выбор материалов для узлов трения КА.

— уточнение методов прогнозирования работоспособности материалов в узлах трения КА.

Научная аппаратура КЭ «Материал — Трение» представляет собой блочное, малогабаритное оборудование, состоящее из:

— трибометра, предназначенного для исследования трения скольжения инденторов (и пальчиков) по диску;

— модуля (4-позиционного) для испытаний подшипников скольжения;

— двух модулей для испытаний зубчатых передач и подшипников качения.

Организации Украины должны разработать, изготовить и провести весь цикл необходимых испытаний комплекта модульных трибометров, предназначенного для исследования трения скольжения инденторов по диску [1].

Модульный трибометр должен обеспечивать: измерение силы трения; измерение износа инденторов и диска; измерение температуры в контрольных точках; регистрацию исследуемых параметров, обработку информации для передачи на бортовой вычислительный комплекс.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА ПАРЫ ТРЕНИЯ

Отличительной особенностью разрабатываемого трибометра является возможность измерения износа исследуемой пары трения непосредственно в процессе проведения эксперимента как в условиях орбитального полета, так и наземной лаборатории.

С этой целью ГНПП «Спецавтоматика» разработана система измерения износа пары трения на базе тензометрических преобразователей.

Тензометрические преобразователи (датчики) сегодня широко применяются для измерения самых разнообразных величин (измерения силы, веса и т. д.). Такие датчики (в мостовом интегральном исполнении) имеют следующие типовые характеристики:

— максимальное значение коэффициента передачи — до 0.01;

— максимальное напряжение питания — до 1 В;

— годовая нестабильность крутизны функции преобразования — менее 10^{-4} — 10^{-3} ;

— приведенная годовая нестабильность нуля датчика — менее 10^{-3} — $5 \cdot 10^{-3}$.

Рассмотрим возможности и особенности применения этих датчиков в триботехническом эксперименте.

Одним из основных результатов такого эксперимента является определение двух трибологических величин: коэффициента трения и износа трущихся поверхностей.

Коэффициент K_t трения, как известно, определяется по уравнению

$$K_t = F_{tp}/F_n,$$

где F_{tp} и F_n — силы трения и нагрузки.

Для определения коэффициента трения обычно достаточно обеспечить погрешность измерения менее 10^{-3} — $5 \cdot 10^{-3}$. Такие характеристики, как правило, легко получить при использовании современных тензометрических датчиков, параметры которых приведены выше.

При измерениях износа прямое использование современных тензометрических датчиков не позволяет получить необходимый результат. Это обусловлено тем, что погрешность датчиков (данные приведены выше) значительно превышает саму измеряемую величину.

Например, пусть тензодатчик рассчитан на измерение максимального значения деформации Δ упругого элемента, равного 100 мкм (такие диапазоны измерения деформации характерны для современных упругих элементов), которое соответствует максимальному значению коэффициента передачи датчика $K_d = 0.01$ и максимальному значению деформирующей упругий элемент силы $F_n = 100$ Н. В соответствии с законом Гука

$$\Delta = \chi F_n,$$

где χ — жесткость упругого элемента. При погрешности датчика, приведенной выше, ошибка измерения нагрузки составит менее 1 Н, а погрешность измерения деформации — менее 1 мкм. Износ трущейся пары также приводит к изменению деформации упругого элемента. При этом величина износа часто не превышает 1 мкм, а погрешность его измерения должна составлять не более 3-5 %. Такая погрешность измерения в данном случае соответствует деформации упругого элемента, равной 0.03—0.05 мкм. Отсюда видно, что прямые измерения износа в этом случае невозможны.

Рассмотрим более подробно особенности использования тензометрических датчиков в триботехническом эксперименте. Функция преобразования датчика с достаточной для нашего эксперимента точностью описывается уравнением

$$K_d = \Delta K + \alpha F,$$

где α — крутизна функции преобразования датчи-

ка, ΔK — смещение нуля датчика.

Обычно в паспорте на датчик приводятся нестабильность нуля и крутизна функции преобразования на временном интервале в 1 год.

Измерительная аппаратура, разрабатываемая на базе прибора СА-320 для определения параметров датчика, обладает достаточной чувствительностью и позволяет определять изменения коэффициента передачи тензодатчика, не превышающие 10^{-8} относительной величины [1]. Это соответствует чувствительности по перемещению 10^{-4} мкм при использовании датчика с приведенными выше параметрами. Однако такая чувствительность не позволяет производить необходимые измерения без соответствующей методики, учитывающей особенности триботехнического эксперимента. Последний (или один из измерительных сеансов) обычно имеет небольшую продолжительность — порядка единиц часов. При этом в процессе эксперимента величина измеряемых усилий изменяется мало (это в первую очередь касается усилия нагрузки) и обычно не превышает одного — десяти процентов. Поэтому погрешность датчика можно охарактеризовать некоторой величиной ΔK_r .

Значение ΔK_r можно принять равным некоторому постоянному числу, определяемому перед началом эксперимента. Для этого достаточно измерить выходной сигнал датчика перед началом эксперимента и в дальнейшем вычесть значение этого сигнала из результатов последующих измерений. Погрешность датчика за время эксперимента будет равна:

$$\Delta K_r = (T_s/T_r)\Delta K_r.$$

Оценки показывают, что если смещение характеристик датчика является линейной функцией времени, то для КЭ продолжительностью 5—10 ч учет выходного сигнала датчика перед началом эксперимента и переход к измерению его приращений даст возможность измерять деформацию, а следовательно, и износ, величина которого может быть меньше 1 нм. Это следует из того, что отношение длительности эксперимента T_s к продолжительности года T_r равно 10^{-3} .

Если датчик недостаточно стабилен на интервале эксперимента, тогда величину нестабильности датчика в каждый момент времени ΔK_c можно представить линейной функцией времени t (рис. 1):

$$\Delta K_c = \Delta K_{c0} + \beta t,$$

где ΔK_{c0} — выходной сигнал датчика в начале эксперимента, а β — крутизна зависимости выходного сигнала датчика от времени при постоянной нагрузке.

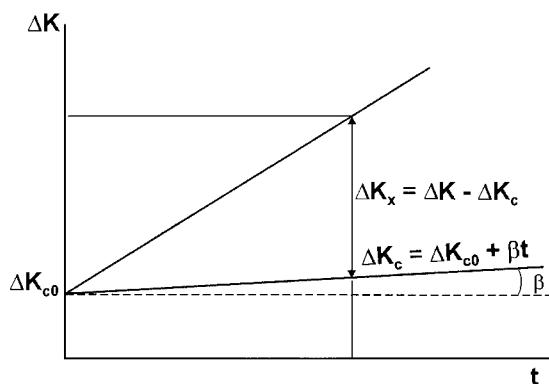


Рис. 1. Учет нестабильности датчика на интервале эксперимента

Для определения коэффициентов рассматриваемой линейной зависимости перед началом эксперимента, на временном интервале, примерно равном длительности эксперимента, необходимо провести два измерения и по ним известными способами вычислить искомые коэффициенты линейной зависимости. После этого в процессе проведения эксперимента для каждого момента времени с начала эксперимента рассчитывают величину ΔK_c и вычитают его из текущего значения измеряемого параметра датчика. Такой подход позволяет в принципе измерять малые деформации (износ) с погрешностью менее 0.1—1.0 % даже при использовании не очень качественных датчиков.

Существенной особенностью триботехнического эксперимента является то, что измерения производятся в динамике, при движении трущихся элементов. Как результат, погрешности сборки и изготовления трущихся поверхностей приводят к сильным помехам при измерении усилия или износа за счет паразитных колебаний сигнала. Например, при измерениях трибологических характеристик в условиях вращения пары трения неперпендикулярность вращающейся детали к оси вращения (биение) приводит к модуляции выходного сигнала датчика синусоидой, а неплоскость трущихся деталей — к наложению на сигнал помехи гармоник. В свою очередь, микронеровности поверхности трущихся деталей вызывают появление в выходном сигнале датчика квазишумовой помехи. Следует отметить, что рассмотренные обстоятельства касаются в одинаковой степени любого типа датчиков и существенно усложняют процесс измерений в трибометрии. Для обеспечения высокой точности измерений необходимо искать оптимальные пути подавления помех разного вида.

Рассмотрим особенности подавления периодических помех квазисинусоидальной или несинусоидаль-

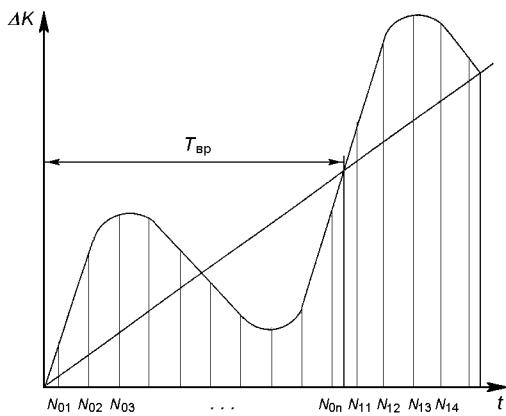


Рис. 2. Способы подавления периодических помех квазисинусоидальной или несинусоидальной формы

дальной формы. Сегодня можно предложить два подхода к решению этой проблемы (рис. 2). Первый подход заключается в снятии информации с выхода датчика в строго заданные моменты времени, при одном и том же угле поворота вращающейся детали. При этом изменения сигнала датчика не будут зависеть от вращения детали, а будут определяться только измеряемым усилием и износом. Для усреднения результата измерения в этом случае необходимо накапливать результаты измерения на выбранных n периодах вращения трущихся деталей:

$$N_k = \sum_{i=1}^n N_{ik} / n.$$

Очевидно, что для реализации данного способа усреднения необходимо иметь датчик числа оборотов.

В последнее время широкое распространение получил весовой способ усреднения для подавления периодической помехи. Для реализации этого способа необходимо проводить усреднение на двух-четырех периодах помехи с последующей математической обработкой результатов измерения. Этот способ позволяет подавлять периодическую помеху за короткое время в сотни тысяч раз. При этом, что очень важно, период подавляемой помехи относительно опорного интервала усреднения может изменяться на многие проценты без снижения эффективности подавления помехи. В этом случае также важно контролировать период помехи:

$$N_n = \sum_{k=1}^{k_m} N_{nk} / k,$$

где $k_m = 2\pi/\varphi$ — целое число; φ — угол между измерениями; $N_\Sigma = \Psi(N_n^1, N_n^2, N_n^3, \dots, N_n^r)$ — окна видов $(\sin^2 x)/x^2$. Подавление шумоподобных помех

может быть одинаково эффективно выполнено любым из описанных способов усреднения. Характерной особенностью этих помех в триботехническом эксперименте является то, что их спектр обычно лежит далеко за пределами спектра периодических помех, и по отношению к ним эти помехи являются высокочастотными. Это облегчает процесс их подавления в процессе усреднения. Выбор того или иного типа усреднения зависит как от условий эксперимента, так и от наличия соответствующего аппаратного обеспечения.

В любом случае применение описанных методов усреднения позволяет добиться значительного подавления помех, и следовательно, является гарантией достижения высокой точности измерений, в том числе и износа трущихся деталей.

КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЬНОГО БЛОКА И ВАРИАНТЫ КОМПОНОВКИ БОРТОВОГО ТРИБОМЕТРА

Бортовой трибометр представляет собой автономную конструкцию, выполненную в виде отдельных модульных трибометров (рис. 3). В настоящее время прорабатывается несколько вариантов компоновки бортового трибометра. Каждый трибометр состоит из двух ведомых образцов 1, а сам ведомый образец представляет собой стандартный шарик диаметром 10 мм, изготовленный из подшипниковой стали и плотно завальцованный в держателе 2. Между держателем и шариком зажата медная пластина 3, к которой припаяна термопара 4 для измерения температуры нагрева шарика. Держатель устанавливается на траверсу 5 и крепится к ней гайкой 6. Ведущий образец состоит из сложенных вместе дисков 7 диаметром ~40 мм, рабочие поверхности которых обращены наружу. Диски зажаты между втулками 8. Втулки установлены на валу 9. Во вращение вал приводится электроприводом.

Траверсы шарнирно соединены между собой с помощью осей 10 и винта 11. Винт устанавливается на кронштейн 12, который на шарикоподшипнике 13 установлен на вал 9. Винт 11 и тензобалка 14 крепятся к кронштейну гайкой. Противоположные концы тензобалки и траверсы соединены между собой винтом 15.

Усилие поджатия ведущих образцов к ведомым осуществляется калиброванной на заданное усилие пружиной 16. Пружина поджимается гайкой 17 на заданный размер, что обеспечивает заданное усилие. Изменение усилия поджатия образцов в процессе испытаний контролируется по двум тензодатчикам, установленным на балке 14.

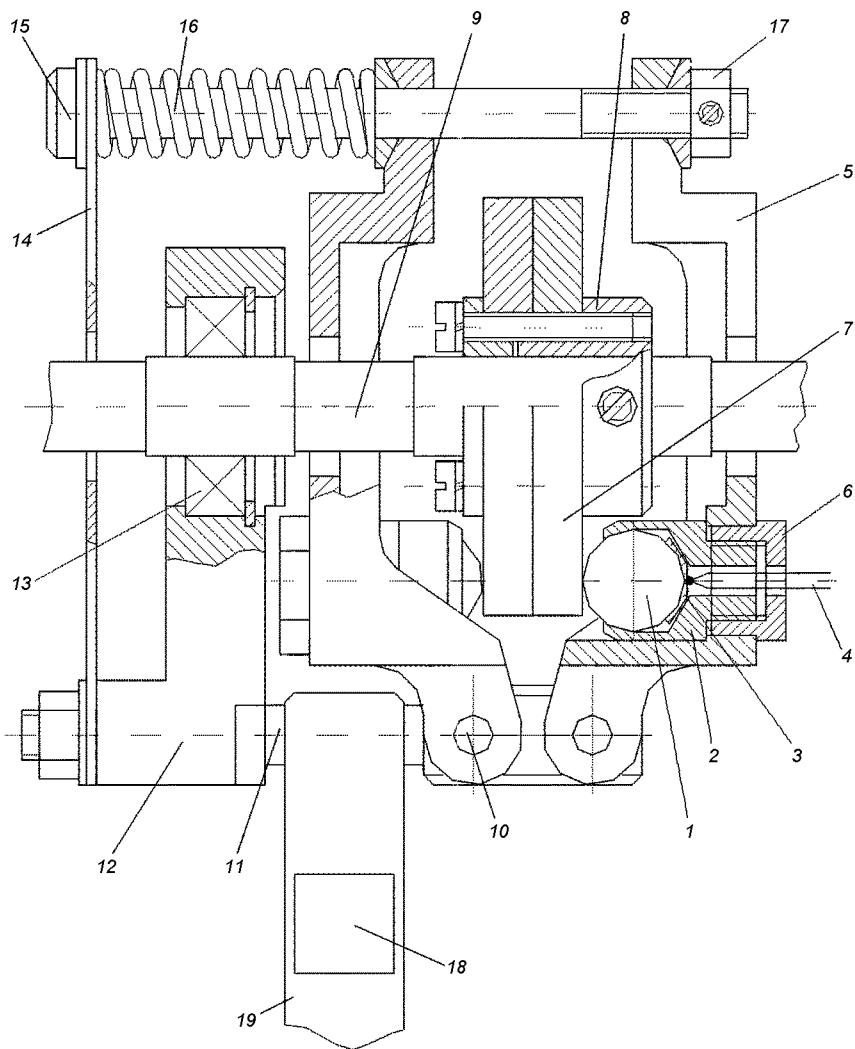


Рис. 3. Модульный трибометр: 1 — ведомый образец (индентор); 2 — держатель образца; 3 — медная пластина; 4 — термопара; 5 — траверса; 6, 17 — гайка; 7 — ведущий образец (диск); 8 — втулка; 9 — вал; 10 — ось; 11, 15 — винт; 13 — шарикоподшипник; 14, 19 — тензобалка; 16 — пружина; 18 — тензодатчик

Сила трения между образцами измеряется тензодатчиком 18, установленным на тензобалке 19, один конец которой закреплен шарнирно в устройстве отключения трибометра, а второй конец упирается в поверхность винта 11.

Следует отметить, что предлагаемый вариант конструкции модульного блока и варианты компоновки орбитального трибометра будут дорабатываться с учетом весовых ограничений выведения на орбиту, которые пока окончательно не определены.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ САМООРГАНИЗАЦИИ В ВАКУУМЕ

В условиях космического вакуума обычные механизмы, обеспечивающие повышение износостойкости материалов в процессе трибоактивации и воз-

никновения нормального механохимического износа, не реализуются в связи с отсутствием атмосферы активных газов (кислорода, азота и углекислого газа). При сухом трении в вакууме в результате накопления пластической деформации и дефектов структуры интенсивно развиваются процессы схватывания. Применение твердых смазок и прочих покрытий из антизадирных соединений, как правило, не позволяет рассчитывать на длительные сроки эксплуатации, особенно в экстремальных ситуациях, когда внешние воздействия могут существенно превышать физико-механические свойства и функциональные возможности покрытий.

Функциональные возможности большинства разработанных в настоящее время материалов определяются индивидуальными свойствами отдельных соединений, входящих в их состав и обладающих определенной антифрикционностью в силу специфики их кристаллического строения. Такие матери-

алы в большинстве случаев равновесны и не обладают нелинейными механизмами адаптации. В настоящее время ресурс повышения функциональных свойств равновесных материалов практически исчерпан. Поэтому дальнейшее повышение функциональных свойств связано с созданием материалов с нелинейными механизмами адаптации. Это свойственно неравновесным физико-химическим системам с элементами самоорганизации.

Толчком к созданию таких материалов послужило бурное развитие и распространение идей неравновесной термодинамики и теории нелинейных открытых динамических систем. Именно достижения в этих областях позволяют ускорить прогресс не только в области создания износостойких материалов с нелинейными механизмами адаптации, но и в материаловедении и технологии в целом, используя не деструктивную, а созидающую функцию внешних потоков энергии. Особенно такая функция проявляется в случае получения неравновесных материалов, обладающих всеми элементами процессов самоорганизации подобно объектам живой материи. В таких материалах в результате воздействия внешних энергетических потоков протекает комплекс сложных физико-химических процессов с возникновением динамически устойчивых образований — диссипативных структур. Эти структуры характеризуются минимальным значением производства энтропии со свойственными им нелинейными механизмами адаптации и самозалечивания. Основной механизм образования таких систем, сформулированный в работах [2, 3], заключается в реализации замкнутого цикла неустойчивостей: термодинамической, химической и индуцированных неравновесных фазовых переходов. Совокупность последовательного возникновения такого рода неустойчивостей позволяет сохранить неравновесность физико-химической системы и соответственно ее продолжительную возбудимость. В таком случае происходит диссипация внешней энергии, которая тратится на возбуждение и поддержание физико-химических процессов, приводящих к релаксации большей части структурных дефектов.

В системах, открытых к внешним потокам вещества, химическая неустойчивость, порождающая диссипативные структуры, возникает сама по себе вследствие нелинейного кинетического закона взаимодействия металла с двухатомным газом [4]. В то же время для материалов, обменивающихся только энергией, источник термодинамической неустойчивости является необходимым элементом неравновесной композиции. Без него нельзя обеспечить постоянную возбудимость системы в отсутствии внешнего обмена веществом. Постоянная воз-

будимость системы может быть достигнута за счет объемного введения в композицию источника термодинамической неустойчивости, химического соединения, термодинамически непрочного в интервале возможных температур, развивающихся в зоне контакта трущихся деталей, где продуктом разложения является элемент, образующий двухатомную молекулу. Получение композиционного материала, содержащего неустойчивое соединение с таким жестким термодинамическим ограничением, возможно только с применением метода порошковой металлургии. При этом матрица или основа материала не должна в процессе консолидации порошковой композиции образовывать термодинамически прочных соединений с продуктом разложения. Это относится также и к любому другому элементу, входящему в состав металлической матрицы. Кроме прочего, для сохранения неравновесности как главного источника и условия возникновения диссипативных структур должны быть наложены кинетические и диффузионные ограничения. Применение этих принципов позволило создать материалы на основе технически важных металлов и сплавов. При этом для существенного повышения износостойкости в несколько раз, а порой и на порядок, достаточно ввести от 0.5 до 2.5 % масс. соединения, являющегося элементом термодинамической неустойчивости, в матрицу на основе известного равновесного сплава.

Сравнительные испытания материалов с элементами самоорганизации и их равновесных аналогов показали, что при введении 1 % об. соединения, являющегося источником постоянной возбудимости системы и соответственно реализующего в системе процессы самоорганизации, обеспечивается повышение износостойкости минимум в два раза на стандартных высокопрочных титановых сплавах и в 5–10 раз на известных износостойких инструментальных стальях.

Результаты сравнительных испытаний образцов высокопрочного титанового сплава на основе α -титана без и с 1 % об. добавкой элемента, приводящего к возникновению термодинамической неустойчивости, показали, что износостойкость материала с элементами самоорганизации возрастает на два-три порядка (рис. 4).

При создании эффективной технологии получения материалов с элементами самоорганизации методом СВС в условиях инициирования реакции потоком лучистой энергии была разработана методика изучения тепловых процессов с применением высокоскоростной многоканальной компьютерной записи температуры. Были проведены эксперименты, которые свидетельствуют о многовариантности

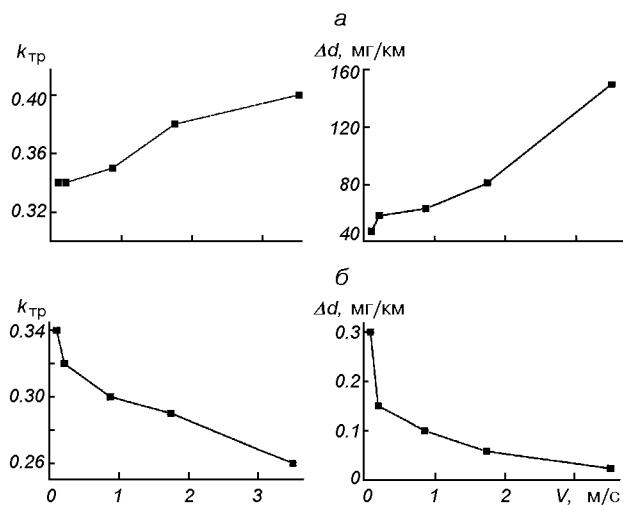


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения k_{tr} и износа J от скорости скольжения: *а* — высокопрочного титанового сплава на основе α -титана, *б* — того же сплава с добавкой 1 % об. элемента термодинамической неустойчивости

поведения неравновесной системы в процессе распространения необратимой экзотермической реакции в объеме материала. Установлено, что выбор траектории эволюции определяется реологическими свойствами порошковой системы, которые задают характер и количество связей между дискретными элементами, определяя тем самым общее макроскопическое поведение: активное спекание всего образца, его рост или зональное обособление усадки.

Методом металлографического, рентгенофазового, микрорентгеноспектрального, а также дериватографического анализов установлен механизм образования диссипативных структур, возникновение которых обусловлено наличием замкнутого цикла неустойчивостей. Основополагающей неустойчивостью является химическая. Как и в классических гомогенных системах, она возникает вследствие появления петли обратной связи в системе сопряженных реакций. Это приводит к автоволновому процессу в дискретно-однородной среде. Суперпозиции концентрационных и тепловых волн инициируют неравновесный фазовый переход, изменяющий масштаб области протекания химических реакций в кинетической зоне. При этом в системе наблюдается автолокализация, вследствие чего экранируется источник термодинамической неустойчивости от диффузионного и кинетического рассея-

ния в окружающую среду.

Однако до настоящего времени остается нерешенным вопрос об адекватности трибологических характеристик, полученных в лабораторных условиях, при моделировании воздействия ФКП на пару трения, и в условиях орбитального полета, в том числе и для антифрикционных, износостойких материалов с элементами самоорганизации. Большой интерес представляет изучение поведения этих материалов в условиях воздействия солнечной радиации, потоков протонов и электронов и т. д. Поскольку материалы с элементами самоорганизации обладают нелинейными механизмами адаптации со свойственными им процессами самозалечивания, то в таких условиях следует ожидать дополнительного улучшения их функциональных свойств. Это и является одной из основных целей проведения КЭ «Материал — Трение».

- Гамуля Г. Д., Скорокход В. В., Солнцев В. П. и др. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал — Трение» // Космічна наука і технологія. — 2002. — № 8. — С. 28—34.
- Скорокход В. В., Солнцев В. П. О динамическом характере устойчивости в порошковых реагирующих системах // Доп. НАНУ. — 2001. — № 11. — С. 74—80.
- Солнцев В. П., Скорокход В. В., Баранов В. Л. Модель автоколебательной топохимической реакции в открытой системе металл — двухатомный газ // Доп. НАНУ. — 2001. — № 12. — С. 83—87.
- Skorokhod V. V., Solntsev V. P., Solntseva T. A. Physicochemical fundamentals of creating materials with elements of self-organization // Proc. Inter. Conf. «Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges». — Kyiv, 2002. — Vol. 1. — P. 60—61.

THE ORBITAL TRIBOMETER AND NEW MATERIALS FOR THE PERFORMANCE OF THE “MATERIAL—FRICTION” SPACE EXPERIMENT

M. A. Bronovets, G. D. Gamulia, Yu. A. Yelanskii, L. T. Zavgorodnyi, V. V. Skorokhod, V. P. Solntsev, M. N. Surdu, V. G. Tikhii, and G. A. Frolov

The state of the preparation of the scientific equipment for realization of the “Material-Friction” space experiment is considered. We offer a method and give an estimate of the error of measurement of wear of pair friction under orbital flight conditions with the use of strain-gauge sensors. The design of a module and versions of layout of orbital tribometer are presented. We derived experimental results confirming a high wear resistance and decrease of wear of pair friction from materials with elements of self-organizing with increasing speed of slip under vacuum conditions.

Л. М. Зелений, Г. М. Тамкович, А. А. Петрукович,
Г. Н. Застенкер, Н. А. Эйсмонт, М. И. Яновский, Л. С. Чесалин

Інститут космічних досліджень РАН, Москва, Росія

**Российско-украинский проект
«Интербол-Прогноз» для исследования
системы солнечно-земных связей.
Высокоапогейный спутник «Интербол-3»**

Подается научная программа спутника «Интербол-3».

ВВЕДЕНИЕ

Перспективный космический проект «Интербол-Прогноз» предлагается как продолжение и развитие весьма успешного международного проекта «Интербол», функционировавшего в 1995—2000 гг. [1] в рамках участия России и Украины в широкой международной кооперации по программе исследований космической погоды — ILWS. В состав проекта предлагается включить группу из двух-трех сравнительно небольших украинских спутников «Прогноз», находящихся на солнечно-синхронной орбите на высоте около 600 км, и российский спутник среднего класса «Интербол-3» с орбитой, позволяющей проводить исследования межпланетной среды и внешней магнитосферы.

Центральной задачей проекта является одновременное исследование широкого спектра проявлений солнечной активности (как «входных сигналов») и отклика на них в магнитосфере и ионосфере (как «результатирующих возмущений»).

В этом плане задачами спутника «Интербол-3» являются исследования разнообразных излучений Солнца (ультрафиолетового, рентгеновского и радиоизлучения), параметров межпланетной среды (плазмы солнечного ветра, магнитного поля, энергичных частиц) и аналогичных (но в более широком наборе) параметров внешней магнитосферы.

В настоящее время исследования по физике солнечно-земных связей не только дают важные фундаментальные результаты, но и находятся в центре внимания из-за наблюдаемого влияния солнечной активности и земных магнитных бурь как на работоспособность современных технических систем, так и на биосферу, включая и человека [2—5]. Эти исследования подтвердили необходимость обеспечения прикладной информацией о космической погоде широкого круга отечественных потребителей в науке, народном хозяйстве, медицине и в других сферах. В связи с развитием средств космической связи и навигации, освоением северных территорий, осуществлением трансполярных перелетов гражданской авиации и пр. зависимость человечества от солнечно-космических факторов в будущем только усилится. Поэтому предлагаемая (как одна из задач проекта «Интербол-Прогноз») отработка методов комплексного мониторинга и прогнозирования солнечной, геомагнитной, авроральной и ионосферной активности является весьма перспективной и важной. Предыстория проекта подробно изложена в работе Г. М. Тамковича и др. [7].

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ВЫСОКОАПОГЕЙНОГО СПУТНИКА «ИНТЕРБОЛ-3»

Известно, что солнечная активность и связанные с ней явления в околосземном пространстве (напри-

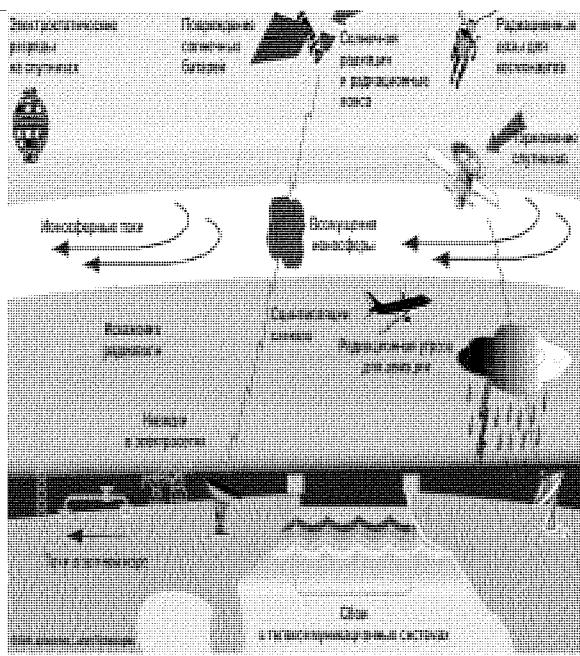


Рис. 1 Схема возможных воздействий солнечной активности на технические системы и человека

мер, магнитные бури) оказывают существенное влияние на системы связи и навигации, работоспособность космических аппаратов, на климат и состояние атмосферы Земли, на здоровье людей. Очень схематично совокупность этих воздействий представлена на рис. 1.

Реакцию земных процессов на солнечную активность принято называть космической погодой. В настоящее время в повестке дня стоят проблемы изучения закономерностей, своевременного предупреждения и адекватной оценки рисков такого солнечного влияния. Одним из стержневых направлений работ по космической погоде являются спутниковые наблюдения в солнечном ветре и в околоземном пространстве, позволяющие давать наиболее надежный оперативный прогноз («штормовое предупреждение») и мониторинг процессов преобразования энергии в геосфере [6]. В рамках реализации проекта «Интербол-Прогноз», на спутнике «Интербол-3» будут решаться следующие задачи:

- 1) практическая отработка методик и системы прогноза и мониторинга космической погоды в различных точках околоземного пространства;
- 2) продолжение фундаментальных исследований магнитосферы Земли и солнечно-земных связей, необходимых для улучшения качества прогноза;
- 3) измерения космического миллиметрового из-

лучения для ряда научных и прикладных задач.

Для наиболее полного выполнения задач проекта предполагается продолжить участие в международных программах исследований околоземного пространства и обмен научными данными в рамках международной кооперации. В то же время наличие собственных измерений солнечного ветра позволит сделать шаг к достаточной автономности российско-украинской системы прогноза космической погоды. Здесь следует подчеркнуть важность сохранения и развития сложившейся и весьма плодотворной научной и научно-технической кооперации в космических исследованиях весьма большого числа организаций Украины и России.

Прикладные задачи проекта по космической погоде. В рамках проекта предлагается провести исследование физических, методических и технических аспектов создания специализированных систем для мониторинга и прогноза солнечного воздействия на околоземное пространство — космической погоды. С этой целью планируется решить следующие задачи:

- выбор оптимального набора измеряемых параметров, например, вспышек солнечных рентгеновских лучей, потоков солнечных космических лучей (СКЛ), плотности и скорости ионов солнечного ветра, величины и направления межпланетного магнитного поля;
- исследование статистической достоверности измеряемых величин и прогноза в целом. Собственные вариации солнечного ветра и модификация потока солнечной энергии на границе магнитосферы Земли затрудняют выработку абсолютно надежного прогноза. Наряду с исследованием природы таких модификаций целесообразна разработка методики прогноза, носящей вероятностный характер;
- отработка блок-схемы специализированного измерительного комплекса, обеспечивающего гарантированное измерение и передачу параметров космического пространства. Следует отметить сложность передачи большого объема данных с больших расстояний при ограниченной пропускной способности радиолинии;
- отработка системы постоянной передачи, приема и обработки сигнала спутника в режиме реального времени;
- разработка оптимального орбитального сценария для будущих специализированных космических аппаратов.

Научные задачи проекта по исследованию солнечно-земных связей. В ходе исследований фундаментальных проблем физики солнечно-земных связей предполагается основное внимание уде-

лить ключевым областям магнитосферы, в которых происходит преобразование потока солнечной энергии в энергию магнитосферных и ионосферных возмущений:

Исследования характеристик солнечного ветра и его изменчивости. Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле (ММП) несут в себе отпечатки стационарных и транзиентных структур, содержащихся в солнечной короне, фотосфере и в солнечном магнитном поле. Поэтому поток солнечного ветра является наиболее важным агентом–переносчиком к Земле последствий всплесков солнечной активности. Помимо вариаций, имеющих солнечное происхождение, в солнечном ветре наблюдаются еще и собственные колебания, рождающиеся на этапе его ускорения во внешней короне и во время его распространения. Наиболее интенсивные и опасные с практической точки зрения события связаны с выбросами солнечной корональной массы в межпланетное пространство.

К основным целям проекта в этой области можно отнести:

- исследования собственно изменчивости и структуры солнечного ветра и ММП;
- изучение воздействия солнечного ветра на магнитосферу.

В рамках международного разделения труда один из научно–исследовательских космических аппаратов всегда находится в солнечном ветре. Однако для проведения полноценных исследований предпочтительнее иметь данные одновременно с двух–трех аппаратов, что позволит получать информацию о характерных пространственных и временных масштабах и, главное, оценивать наклоны резких фронтов возмущений плазмы и ММП.

Исследования модификации потока солнечной плазмы и магнитного поля в магнитослое и на ударной волне. Известно, хотя и не всегда принимается во внимание, что магнитослой является интерфейсом между межпланетной средой и магнитосферой, поэтому на магнитопаузу как на границу магнитосферы воздействуют не собственно солнечный ветер и межпланетное магнитное поле, а плазма и поле, существенно измененные (модифицированные) в области магнитослоя и на ударной волне. Определение характера указанной модификации и количественная оценка изменений как плазмы, так и магнитного поля в магнитослое должны быть существенной частью исследований влияния солнечного ветра и ММП на магнитосферу. Как показали исследования на спутнике «Интербол–1», существующие модели лишь качественно совпадают с действительностью. Однако еще более серьезная проблема, как было особенно на-

глядно показано в этих исследованиях, связана с тем, что магнитослой является не только «трансформатором» возмущений, приходящих из межпланетной среды, но и «генератором» вариаций плазмы и магнитного поля, взаимодействующих потом с магнитопаузой. При этом рожденные в магнитослое вариации плотности плазмы и амплитуды магнитного поля, как правило, в несколько раз превышают одновременно наблюдающиеся вариации этих параметров в солнечном ветре.

Исследования процессов накопления и высвобождения энергии в геомагнитном хвосте. Энергия солнечного ветра аккумулируется на ночной стороне магнитосферы в геомагнитном хвосте. При умеренном потоке энергии в магнитосферу (характерном для магнитных суббурь), она начинает высвобождаться взрывным образом спустя некоторое время (порядка 1 ч) после внешнего возмущения.

Во время магнитных бурь интенсивность воздействия на магнитосферу и магнитный хвост такова, что процессы высвобождения и накопления энергии протекают практически одновременно, а геометрия магнитного хвоста существенно изменяется. Несмотря на то, что общая последовательность событий во время бурь и суббурь довольно хорошо изучена, остается большое количество невыясненных вопросов, имеющих принципиальное значение для задач, связанных с космической погодой. Так, в частности, в некоторых случаях сброс накопленной энергии из хвоста к Земле принимает взрывообразный периодический характер (последовательность суббурь), а в некоторых событиях он имеет стационарный характер (интервалы усиленной конвекции без суббурь). Доля энергии солнечного ветра, попадающая во внутреннюю магнитосферу, и поэтому наиболее важная практически, критически зависит от конкретного сценария развития магнитосферной конвекции.

Можно выделить три ключевых области магнитного хвоста, которые будут подробно исследованы в проекте «Интербол–3».

1. Область перехода от дипольных к вытянутым силовым линиям (40 000–70 000 км). Именно здесь энергия солнечного ветра посредством инжекций плазмы проникает непосредственно во внутреннюю магнитосферу.

2. Область ближнего хвоста (20 000–700 000 км). На этом удалении от Земли комбинация различных факторов делает наиболее вероятным и успешным развитие неустойчивостей, инициирующих процесс взрывообразного высвобождения энергии.

3. Область среднего хвоста (200 000–400 000 км). По современным представлениям, именно эта об-

ласть плазменного слоя хвоста заполняется частицами солнечного ветра, которые, ускоряясь, поступают ближе к Земле, и в конечном счете определяют наполнение магнитосферы горячей плазмой. Здесь также поддерживается естественный квазистационарный процесс пересоединения магнитных силовых линий, в ходе которого выделяется накопленная в хвосте энергия. Когда интенсивность этого процесса оказывается недостаточной, ситуация развивается по взрывному сценарию.

Исследования внутренней магнитосферы. В ходе магнитных бурь, связанных со всплесками солнечной активности, энергия солнечного ветра, как накопленная в геомагнитном хвосте, так и непосредственно поступающая из межпланетного пространства, попадает во внутреннюю магнитосферу Земли.

Традиционно к внутренней магнитосфере относят область с дипольными силовыми линиями земного магнитного поля вплоть до ионосферы (высоты до 60000 км). Увеличение числа энергичных частиц на этих силовых линиях приводит к модификации магнитного поля Земли, к прямым высыпаниям частиц в ионосферу и к возбуждению низкочастотных пульсаций. В отличие от высоколатитных возмущений, генерируемых в удаленных областях магнитосферы, возмущения, связанные с процессами во внутренней магнитосфере, воздействуют также и на умеренные и низкие широты и, соответственно, носят глобальный характер.

Несмотря на важность подробных измерений в этой области магнитосферы, до сих пор не накоплено достаточного количества экспериментальных данных, позволяющих количественно описать процессы накопления и диссиляции энергии. Проведение надежных измерений энерго-угловых распределений энергичных частиц и магнитного поля, планируемое в проекте «Интербол-3», позволит уточнить причинно-следственные связи событий в этой критически важной области магнитосферы.

Исследования естественного фона миллиметрового излучения. В ходе проекта, в рамках фундаментальных работ по изучению физики как околоземного, так и удаленного космического пространства, планируется проведение с борта КА измерений степени пространственной анизотропии и величины поляризации излучения в миллиметровом диапазоне длин волн. Научная аппаратура, устанавливаемая на борту КА для проведения этого эксперимента, представляет собой комплекс сверхвысокочастотных радиометров, снабженных узко направленными антennами и измерителями степени поляризации принятого сигнала.

ОРБИТАЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ ПРОЕКТА

Предлагаемая научная программа не может быть выполнена на простой кеплеровской орбите искусственного спутника Земли и требует составления сложного орбитального сценария. Для наиболее полных исследований по тематике космической погоды КА должен находиться в солнечном ветре впереди Земли, (например, в точке либрации L1). Для исследований магнитосферы наиболее подходят высокоапогейные эллиптические орбиты.

Представляется оптимальным следующий вариант орбитального сценария (см. рис. 2).

I этап. Перелет космического аппарата к передней точке либрации (L1) и возврат к Земле. Общая длительность этапа составляет несколько месяцев. Основная задача первого этапа — проведение научных и технологических исследований по тематике космической погоды: отработка режимов вывода аппарата на орбиту к точке L1, проведения сеансов связи с Землей с целью управления и передачи данных. Также будут производиться постоянные измерения солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и потоков солнечных энергичных частиц.

II этап. Переход аппарата на орбиту высокоапогейного спутника с низким наклонением и длительное функционирование на ней. Приоритет на этой орбите отдается измерениям в магнитосфере Земли и солнечном ветре. Оптимальное сочетание времени нахождения спутника в солнечном ветре и ключевых областях магнитосферы (в хвосте магнитосферы в пределах удаления до 180 000 км от линии Земля — Солнце) может быть получено на орбите с апогеем около 400 000 км и периодом около 11 дней. Достоверные измерения СВЧ-излучения на такой орбите возможны примерно в течение 50 % времени.

III этап. При наличии резерва топлива на борту на заключительном этапе проекта возможен перевод аппарата на гало-орбиту вокруг задней точки либрации L2, наиболее удобную для измерений СВЧ-излучения с низким уровнем помех. На этой орбите представляет интерес также измерение параметров солнечного ветра и ММП Земли на большом удалении позади Земли («очень дальний хвост»).

ТРЕБОВАНИЯ К КОСМИЧЕСКОМУ АППАРАТУ

Проведение эксперимента по исследованию космической плазмы налагает на конструкцию используемого космического аппарата ряд специфических требований, а именно:

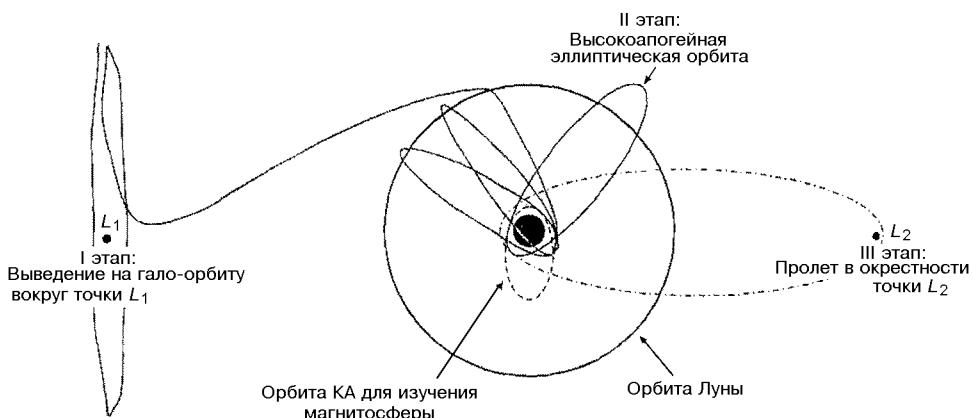


Рис. 2. Орбитальный сценарий для спутника «Интербол-3»

1) КА должен обеспечивать требуемое размещение научной аппаратуры, электропитание, управление и передачу данных измерений;

2) КА должен быть стабилизирован вращением вокруг оси, направленной на Солнце с точностью не хуже 10° . Оптимальный период вращения — 10—30 с. Знание ориентации: не хуже 0.5° ;

3) КА должен удовлетворять требованиям по магнитной чистоте и электромагнитной совместимости (аналогичным требованиям к КА «Интербол»);

4) КА должен быть снабжен двумя или четырьмя раскрывающимися штангами в плоскости, перпендикулярной к оси вращения. Длина штанг должна быть не менее 5 м. Штанги предназначены для размещения датчиков магнитного и электрического полей.

Модельный комплект научной аппаратуры проекта включает в себя:

- феррозондовый магнитометр (два датчика),
- анализатор потока ионов солнечного ветра,
- солнечный рентгеновский фотометр,
- спектрометры тепловых ионов и электронов,
- спектрометр энергичных ионов и электронов,
- детектор солнечных космических лучей,
- система сбора информации и управления научной аппаратурой,
- электрометр,
- анализатор спектров плазменных волн,
- детектор холодной плазмы,
- спектрометр солнечного ветра,
- анализатор ионного состава плазмы,
- комплекс радиометров миллиметрового диапазона,
- система сбора, запоминания и бортовой обработки научной информации, являющаяся «интеллектуальным развитием» системы ССНИ, успешно работавшей в проекте «Интербол».

Вес полного набора аппаратуры составит около 120—150 кг, потребление энергии около 160 Вт.

В настоящее время рассматривается несколько возможных вариантов конструкции КА на основе новой базовой платформы с использованием современных технологий. Предполагается, что запуск КА может быть осуществлен готовой связкой РН «Союз» с РБ «Фрегат» или разрабатываемой в настоящее время системой на основе конверсионного РН «Днепр» и специального РБ.

Следует еще остановиться на возможностях управления аппаратом и приема научной и служебной информации. Наиболее подходящим решением этой непростой (с учетом больших расстояний до аппарата) задачи явилось бы использование Центра дальней космической связи в г. Евпатория (рис. 3). Тем более, что этим Центром накоплен богатый опыт по непрерывной и весьма успешной работе в течение 1995—2000 гг. с двумя спутниками проекта «Интербол».

ВЫВОДЫ

Предполагается, что проект «Интербол-Прогноз» будет реализован при значительном участии предприятий и организаций России и Украины в изготовлении научной аппаратуры, проведении сеансов связи из Центра дальней космической связи в г. Евпатория. Неотъемлемой частью проекта является также его низкоорбитальный сегмент, состоящий из 2-3 микроспутников, полностью реализуемый украинской стороной. В сочетании с планируемыми наблюдениями Солнца с борта научной космической обсерватории «Коронас-Фотон» и наземными измерениями такой перспективный проект по тема-



Рис. 3. Одна из антенных систем Центра дальней космической связи в г. Евпатория

тике солнечно-земных связей станет основой полноценной программы исследований по космической погоде (рис. 4).

Разработки российских и украинских ученых и специалистов показали, что в настоящее время есть уникальная возможность приблизительно за три года осуществить подготовку и начать одновременную работу всей системы спутников проекта. Необходимо отметить, что ранее советские и российские КА не работали на орbitах в точках либрации, и предстоит впервые решить задачи вывода КА в окрестности точки, управления и приема телеметрии с такой орбиты. Наработка подобного опыта будет иметь большое значение как для развития космонавтики в целом, так и для реализации последующих проектов (точки либрации являются приоритетными местами размещения ряда перспективных астрофизических и прикладных КА). В настоящее время спутник «Интербол-3» как составная часть проекта «Интербол-Прогноз» предложен для включения в новую федеральную космическую программу России.

- Галеев А. А., Гальперин Ю. И., Зеленый Л. М. Проект ИНТЕРБОЛ по исследованиям в области солнечно-земной физики // Космич. исслед.—1996.—№ 4.—С. 339—



Рис. 4. Схема наблюдений и прогноза космической погоды

362.

- Гальперин Ю. И., Дмитриев А. В., Зеленый Л. М., Панасюк М. И. Влияние космической погоды на безопасность авиационных и космических полетов // Полет.—2001.—№ 1.—С. 27.
- Петрукович А. А., Климов С. И. Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности // Космич. исслед.—2000.—№ 5.—С. 463.
- Петрукович А. А., Зеленый Л. М. В объятиях Солнца // Наука и жизнь.—2001.—№ 7.—С. 2.
- Петрукович А. А., Зеленый Л. М. У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь.—2001.—№ 10.—С. 57.
- Петрукович А. А., Зеленый Л. М. Прогноз погоды XXI века // Наука и жизнь.—2002.—№ 5.—С. 2.
- Тамкович Г. М., Зеленый Л. М., Петрукович А. А. Перспективный российско-украинский проект «Интербол-Прогноз», возможности и реалии // Полет.—2002.—№ 5.—С. 14.

THE RUSSIAN-UKRAINIAN PROJECT “INTERBOL-PROGNOZ” FOR THE INVESTIGATION OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS. THE HIGH-APOGEE SATELLITE “INTERBOL-3”

*L. M. Zelenyi, G. M. Tamkovich, A. A. Petrukovich,
G. N. Zastenker, N. A. Eismont, M. I. Yanovskii,
and L. S. Chesalin*

The scientific program of the satellite “Interbol-3” is presented.

Рис. 3. Одна из антенных систем Центра дальней космической связи в г. Евпатория

тике солнечно-земных связей станет основой полноценной программы исследований по космической погоде (рис. 4).

Разработки российских и украинских ученых и специалистов показали, что в настоящее время есть уникальная возможность приблизительно за три года осуществить подготовку и начать одновременную работу всей системы спутников проекта. Необходимо отметить, что ранее советские и российские КА не работали на орbitах в точках либрации, и предстоит впервые решить задачи вывода КА в окрестности точки, управления и приема телеметрии с такой орбиты. Наработка подобного опыта будет иметь большое значение как для развития космонавтики в целом, так и для реализации последующих проектов (точки либрации являются приоритетными местами размещения ряда перспективных астрофизических и прикладных КА). В настоящее время спутник «Интербол-3» как составная часть проекта «Интербол-Прогноз» предложен для включения в новую федеральную космическую программу России.

- Галеев А. А., Гальперин Ю. И., Зеленый Л. М. Проект ИНТЕРБОЛ по исследованиям в области солнечно-земной физики // Космич. исслед.—1996.—34, № 4.—С. 339—

Рис. 4. Схема наблюдений и прогноза космической погоды

362.

- Гальперин Ю. И., Дмитриев А. В., Зеленый Л. М., Панасюк М. И. Влияние космической погоды на безопасность авиационных и космических полетов // Полет.—2001.—№ 1.—С. 27.
- Петрукович А. А., Климов С. И. Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности // Космич. исслед.—2000.—№ 5.—С. 463.
- Петрукович А. А., Зеленый Л. М. В объятиях Солнца // Наука и жизнь.—2001.—№ 7.—С. 2.
- Петрукович А. А., Зеленый Л. М. У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь.—2001.—№ 10.—С. 57.
- Петрукович А. А., Зеленый Л. М. Прогноз погоды XXI века // Наука и жизнь.—2002.—№ 5.—С. 2.
- Тамкович Г. М., Зеленый Л. М., Петрукович А. А. Перспективный российско-украинский проект «Интербол-Прогноз», возможности и реалии // Полет.—2002.—№ 5.—С. 14.

THE RUSSIAN-UKRAINIAN PROJECT “INTERBOL-PROGNOZ” FOR THE INVESTIGATION OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS. THE HIGH-APOGEE SATELLITE “INTERBOL-3”

L. M. Zelenyi, G. M. Tamkovich, A. A. Petrukovich,
G. N. Zastenker, N. A. Eismont, M. I. Yanovskii,
and L. S. Chesalin

The scientific program of the satellite “Interbol-3”is presented.

УДК 520.6 +520.8

Ю. Д. Котов, В. Н. Юров, С. И. Болдырев

Інститут астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету), Росія

Научные задачи и характеристики научной аппаратуры российского спутникового проекта КОРОНАС-ФОТОН

Подано основні відомості про супутниковий проект КОРОНАС-ФОТОН, що створюється в рамках космічної програми Росії. Апарат КОРОНАС-ФОТОН є третім супутником російської програми КОРОНАС. Основна наукова мета проекту: дослідження процесів накопичення енергії та її перетворення в енергію заряджених частинок під час сонячних спалахів, встановлення механізмів прискорення, розповсюдження і взаємодії швидких частинок в сонячній атмосфері. Комплекс наукової апаратури супутника дозволить вимірювати сонячне електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні енергій від ультрафіолету до високоенергетичного гамма-випромінювання, а також потоки нейтронів та заряджених частинок в навоколоземному просторі. Приведено наукові завдання проекту і описано принципи побудови наукових приладів, їхні основні характеристики і організація взаємодії із системами супутника. Запуск супутника КОРОНАС-ФОТОН на колову орбіту висотою 500 км і нахиленням 82.5° наміченого на 2006 р.

ВВЕДЕНИЕ

КОРОНАС (Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца) — российская программа исследования физики Солнца и солнечно-земных связей с помощью околоземных космических аппаратов, которая предусматривает запуск на околоземную орбиту трех солнечно-ориентированных спутников.

КОРОНАС-ФОТОН — третий спутник в этой серии. Его запуск планируется на 2006 г. Два других спутника, КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф, запущены на орбиту соответственно 2.03.1994 и 31.07.2001 гг. Спутник КОРОНАС-Ф и его научная аппаратура продолжают успешно функционировать на орбите. Дополнительная информация о проектах КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф дана на сайте ИЗМИРАН (<http://coronas.izmiran.rssi.ru>). Головной организацией по комплексу научной аппаратуры проекта КОРОНАС-ФОТОН является Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) — МИФИ, по космическому

аппаратуру КА КОРОНАС-ФОТОН — Научно-исследовательский институт электромеханики — НИИЭМ (Московская область, г. Истра).

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Проект КОРОНАС-ФОТОН направлен на детальное изучение характеристик высокоэнергичных процессов во время солнечных вспышек путем регистрации жесткого электромагнитного излучения до энергий сотен МэВ и сопутствующего ему ультрафиолетового, рентгеновского и корпускулярного излучений. Ниже перечислены основные задачи проекта.

1. В области физики Солнца:

1.1. Определение функций распределения в хромосферных и корональных структурах ускоренных в процессе вспышки электронов, протонов и ядер и их эволюции с высоким временным разрешением (для жесткого рентгена вплоть до миллисекунд).

1.2. Исследование различия в динамике ускоре-

ния электронов и протонов (ядер).

1.3. Исследование особенностей эволюции функции распределения для высокoenергичных частиц (вплоть до нескольких гигаэлектрон-вольт).

1.4. Исследование угловой анизотропии взаимодействующих частиц на основании статистического анализа спектров излучения и параметров линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения (величины и положения плоскости поляризации) для разных гелиоцентрических углов.

1.5. Изучение эффектов направленности в области гамма-излучения высоких энергий.

1.6. Определение механизмов и условий ускорения электронов и протонов на различных фазах вспышки, а также параметров области удержания (распространения) ускоренных частиц.

1.7. Установление обилия элементов в области генерации гамма-излучения методом гамма-спектроскопии и по скорости захвата нейtronов низких энергий в атмосфере Солнца.

1.8. Оценка высот генерации вторичных излучений по наблюдению ослабления дейтонной линии от лимбовых вспышек.

1.9. Определение вида энергетического спектра ускоренных протонов и ядер и динамики этих спектров по соотношению ядерных гамма-линий.

1.10. Исследование проблемы образования элементов (D , 3He , Li , Be) во время вспышек.

2. В области солнечно-земной физики:

2.1. Измерение на околоземной орбите химического и изотопного составов ускоренных во вспышке ядер, а также энергетических и временных характеристик вспышечных электронов и протонов.

2.2. Мониторинг верхних слоев атмосферы Земли по поглощению жесткого ультрафиолета спокойного Солнца.

2.3. Исследование химического и элементного состава космических лучей и их питч-углового распределения в магнитосфере Земли.

3. Попутные исследования в области астрофизики:

3.1. Регистрация рентгеновского и гамма-излучения космических гамма-всплесков.

3.2. Выделение рентгеновских источников, расположенных в плоскости эклиптики, и измерение их спектров в жестком рентгеновском диапазоне.

На это же время запланирован запуск двух космических аппаратов по исследованию Солнца: японского аппарата «Solar-B» (сентябрь 2005 г.) [www.isas.ac.jp/e/enterp/missions/solar-b] и американского аппарата SDO (август 2007 г.) [<http://lws.gsfc.nasa.gov>] с участием широкой международной кооперации. Спутник SDO явится первым

спутником международной программы «Жизнь со звездой» — ILWS. Оба эти спутника будут обладать уникальными энергетическим и угловым разрешениями в области ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения, но не будут содержать инструментов по изучению жесткого излучения солнечных вспышек. Совместная работа этих спутников со спутником КОРОНАС-ФОТОН обеспечит расширение исследуемого диапазона энергий и позволит осуществить привязку наблюдаемых жестких излучений к определенным областям на поверхности Солнца.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КНА ФОТОН

При построении комплекса научной аппаратуры (КНА ФОТОН) проекта КОРОНАС-ФОТОН реализовывались следующие принципы:

- использование режимов одновременного наблюдения Солнца всеми приборами КНА для построения физической картины развития событий на Солнце во всем регистрируемом диапазоне излучений, построение изображений диска Солнца в УФ-области спектра для пространственной привязки высокoenергичных гамма-событий и пространственно-энергетический анализ потоков заряженных частиц на орбите космического аппарата для определения фоновых условий;

- управление режимами работы аппаратуры, ее адаптация к условиям проведения экспериментов в полете с помощью передаваемой командно-программной информации;

- использование приборов с высокой светосилой, построенных по модульному принципу или с быстродействующими детекторами для увеличения загрузочной способности и улучшению соотношения сигнал/фон;

- постоянное или регулярное проведение полетной калибровки аппаратуры с использованием фоновых измерений и образцовых источников ионизирующего излучения;

- обеспечение высокой надежности выполнения целевых задач за счет резервирования в ряде приборов измерительных каналов и частичного перекрытия в разных приборах измеряемых спектральных диапазонов;

- использование высокоинформационного канала передачи на двух различных частотах научных и служебных данных с приборов КНА на один наземный телеметрический пункт приема.

Приборный состав комплекса научной аппаратуры ФОТОН приведен в табл. 1.

Таблица 1. Основные физические характеристики приборов КНА ФОТОН

Аппаратура	Организация-разработчик	Назначение
Спектрометр высокoenергичных излучений НАТАЛЬЯ-2М	Московский инженерно-физический институт (МИФИ), Москва, Россия	<ul style="list-style-type: none"> — Регистрация энергетических спектров гамма-излучения солнечных вспышек. — Регистрация нейтронов солнечного происхождения
Поляриметр жесткого рентгеновского излучения ПИНГВИН-М	МИФИ, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия	<ul style="list-style-type: none"> — Измерение линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. — Рентгеновская и гамма-спектрометрия. — Мониторинг мягкого рентгеновского излучения Солнца
Рентгеновский и гамма-спектрометр КОНУС-РФ	Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия	<ul style="list-style-type: none"> — Исследование эволюции солнечных вспышек в рентгеновском излучении с высоким энергетическим и времененным разрешением. — Мониторинг жесткого рентгеновского излучения Солнца и космических гамма-всплесков
Быстрый рентгеновский монитор БРМ	МИФИ	<ul style="list-style-type: none"> — Быстрый мониторинг жесткого рентгеновского излучения Солнца. — Регистрация временных профилей интенсивности излучения солнечных вспышек в шести диапазонах энергий
Телескоп-спектрометр ТЕСИС	Физический институт им. П. Н. Лебедева, Москва, Россия	<ul style="list-style-type: none"> — Регистрация изображений Солнца в узкополосных спектральных интервалах и монохроматических линиях излучения ионов высокотемпературной плазмы короны
Многоканальный монитор ультрафиолетового излучения ФОКА	МИФИ, Астрофизический институт, Потсдам, Физико-технический институт им. Фраунгофера, Фрайбург, Германия	<ul style="list-style-type: none"> — Мониторинг жесткого ультрафиолетового излучения Солнца в шести спектральных окнах. — Измерения поглощения ультрафиолетового излучения Солнца в верхних слоях атмосферы Земли
Анализатор заряженных частиц ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА	Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скobelьцина, МГУ, Москва, Россия. Университет де Алкала, Мадрид, Испания	<ul style="list-style-type: none"> — Измерение энергетических спектров и зарядового и изотопного состава ядер, ускоренных в процессах солнечных вспышек. — Регистрация потоков и построение энергетических спектров солнечных электронов. — Регистрация потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли на высотах орбиты КА
Телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф	Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина.	<ul style="list-style-type: none"> — Регистрация потоков электронов, протонов и альфа-частиц в магнитосфере Земли на высотах орбиты КА. — Измерение направлений прихода частиц с точностью 8—10°
Телескоп низкоэнергичного γ -излучения RT-2	ТАТА институт фундаментальных исследований, Мумбай, Индия	<ul style="list-style-type: none"> — Регистрация временных профилей интенсивности солнечного и галактического рентгеновского излучения. — Спектрометрия солнечного, галактического и внегалактического рентгеновского излучения

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАУЧНЫХ ПРИБОРОВ

Спектрометр высокoenергичных излучений НАТАЛЬЯ-2М [3, 4]. В регистрирующий блок прибора входят два спектрометра, содержащие по восемь сцинтилляционных модулей с кристаллами CsI(Tl), и защитные сцинтилляционные детекторы из полистирола. Все 16 измерительных каналов спектрометров при эксплуатации стабилизируются подачей на каждый из них сигналов от эталонного светового источника через волоконные световоды. Для энергетической калибровки используютсяadioактивные альфа- и гамма-источники. Разделение нейтронных и гамма-событий осуществляется на основе анализа формы выходного сигнала. Ос-

новные характеристики спектрометра показаны в табл. 2.

Поляриметр жесткого рентгеновского излучения ПИНГВИН-М [5]. Блок детекторов содержит детектор-рассевиватель из паратерфенила, детекторы рас-ссяянного излучения на кристаллах CsI(Na), защитные детекторы из полистирола и ксеноновые пропорциональные счетчики. При измерениях регистрирующие каналы стабилизируются с помощью сигналов от реперного светового источника. Осуществляется также контроль симметрии поляриметра образцовым гамма-источником. Каналы регистрации и характеристики поляриметра представлены в табл. 3.

Рентгеновский и гамма-спектрометр КОНУС-РФ [1]. Прибор имеет два блока детекти-

Таблица 2. Основные характеристики спектрометра НАТАЛЬЯ-2М

Канал	Энергетический диапазон, МэВ	Эффективная площадь, см ²	Энергетическое разрешение ΔE/E	Временное разрешение, с
R (рентгеновские лучи)	0.3—2	920	10.0 % (662 кэВ) измер.	0.001
L (гамма-лучи низкой энергии)	2—10	900	5.0 % (2.5 МэВ) измер.	1
M (гамма-лучи промежуточных энергий)	7—200	800	6.0 % (10 МэВ) расч.	1
H (гамма-лучи высокой энергии)	50—2000	750	32 % (500 МэВ) расч.	1
N (нейтроны)	20—300	37—120	—	32

Таблица 3. Каналы регистрации и характеристики поляриметра ПИНГВИН-М

Канал	Энергетический диапазон, кэВ	Эффективная площадь, см ²	Точность	Временное разрешение, с
Линейная поляризация	20—150	≈ 30	10 %	1
Спектры жесткого рентгена	15—150 20—5000	≈ 30 —	16 энергетич. каналов 128 энергетич. каналов	1
Спектры мягкого рентгена	2—10	≈ 12	32 энергетич. канала (шириной от 0.2 до 2 кэВ)	1

Таблица 4. Основные характеристики спектрометра КОНУС-РФ

Канал	Энергетический диапазон, МэВ	Эффективная площадь, см ²	Энергетическое разрешение ΔE/E, %	Временное разрешение
Детектор солнечный				
а) фоновый режим	0.01—12 0.2—8	150	8 (662 кэВ)	Энергетич. окна: 1—2 с. Спектры до 2 мс
б) вспышка	0.01—12			Спектры до 2 мс
Детектор антисолнечный				
а) фоновый режим	0.01—12 0.2—8	150	8 (662 кэВ)	Энергет. окна: 1—2 с. Спектры до 2 мс
б) вспышка	0.01—12			Спектры до 2 мс

рования с полем зрения 2π стерadian. Ось поля зрения первого ориентирована в солнечном направлении, а второго — в антисолнечном. Для регистрации используются монокристаллические сцинтилляторы NaI(Tl), помещенные в алюминиевые контейнеры с входным окном из бериллия. Иллюминатор между кристаллом и фотоэлектронным умножителем сделан из толстого свинцового стекла для снижения уровня фонового излучения. Основные характеристики спектрометра приведены в табл. 4.

Телескоп-спектрометр ТЕСИС. Прибор состоит из блока датчиков, блока электроники и оптического датчика. Блок датчиков включает в себя четыре независимых канала регистрации изображений Солнца.

Изображения Солнца формируются на чувствительной площадке детектора изображений с помощью специальных зеркал. Для блокировки оптического излучения Солнца в каналах используется многоэлементная система фильтров. Детекторы изображений построены на основе форматных

ПЗС-матриц с электрическим охлаждением. С помощью оптического датчика контролируется по звездам с точностью до $1'$ текущая трехосная ориентация телескопа. Основные характеристики телескопа-спектрометра приведены в табл. 5.

Быстрый рентгеновский монитор БРМ [7]. Регистрация осуществляется быстрым сцинтилляционным детектором на основе алюминиевого пе-ровского, активированного церием $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$, с временем высвечивания 28 нс. Для уменьшения фона перед кристаллом установлен коллиматор с углом зрения 6° . Измерительный канал стабилизируется с помощью импульсов от прецизионного светового источника. Время реакции системы стабилизации 1 с. Основные характеристики быстрого монитора даны в табл. 6.

Многоканальный монитор УФ-излучения ФОКА [8]. Прибор имеет семь каналов регистрации. Каждый канал содержит кремниевый фотодиод AXUV-100 в сборке с коллиматором и соответствующим спектральным фильтром, предуслителя и преобразователь «напряжение — частота — код».

Таблица 5. Основные характеристики телескопа-спектрометра ТЕСИС

Параметр	Канал			
	13.4 нм	30.4 нм	Mg 1	Mg 2
Спектральный диапазон, нм	13.2—13.6	29.5—31.5	0.8418—0.8423	
Линии	Fe XXI—Fe XXIII	He II, Si XI	Mg XII	
Поле зрения	Диск — 35' Корона — от 2 до 5 R_{\odot}	1"	45'	
Угловое разрешение		1 нм	2"	
Спектральное разрешение		0.01—600	0.02 пм/пкл	
Длительность экспозиции, с	100			60
Эффективная площадь зеркал, см ²				

Таблица 6. Основные характеристики быстрого монитора БРМ

Каналы регистрации, кэВ	Эффективная площадь, см ²	Временное разрешение
20—30	20	до 2—3 мс
30—40	20	
40—50	20	
50—70	20	
70—130	20	
130—600	15	
20—600	15	

Таблица 7. Основные характеристики УФ-монитора ФОКА

Номер диапазона	Ширина спектрального диапазона, нм	Основные эмиссионные линии
1	< 10	—
2	17—35	30.4 нм — He II, Si XI
3	55—63	58.4 нм — He I
4	70—90	80 нм — O II—O IV
5	90—110	102.6 нм — L_{β}
6	120—130	121.6 нм — L_{α}
7	400—1100	—

Точность измерения абсолютной интенсивности составляет порядка нескольких процентов от полного потока. Оккультиационные (затменные) измерения — наблюдения диска Солнца через верхние слои земной атмосферы позволяет получить распределение температуры и плотности на высотах 150 — 550 км. Основные характеристики УФ-монитора представлены в табл. 7.

Анализатор заряженных частиц ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА. Заряженные частицы регистрируются телескопом-системой из четырех полупроводниковых кремниевых ионно-имплантированных детекторов, размещенных в цилиндрической алюминиевой пассивной защите. Идентификация частиц и определение их энергии производится по их удельной ионизации при движении в системе детекторов. Основные характеристики анализатора частиц приведены в табл. 8.

Таблица 8. Основные характеристики анализатора частиц ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА

Характеристика	Значение
Геометрический фактор	2—3 см ² спр.
Угол зрения	50°
Зарядовое разрешение	0.5 е
Массовое разрешение	0.5 а. е. м.
Эффективная площадь детекторов	9, 6, 9 и 12 см ²
Энергетический диапазон	
Электроны	0.2—2.0 МэВ
Протоны	1—50 МэВ
Ядра с $Z < 26$	2—50 МэВ/нуклон

Таблица 9. Основные характеристики телескопа СТЭП-Ф

Характеристика	Значение
Геометрический фактор	20 см ² спр.
Угловое разрешение	8°
Поле зрения	97° × 97°
Эффективная площадь:	
полупроводниковые детекторы	20 см ² каждый
сцинтиляционные детекторы	36 см ² ; 49 см ²
Размер элементов матрицы ППД	7.3 мм × 7.3 мм
Количество элементов в ППД	36
Энергетический диапазон	
электроны	0.4—14.3 МэВ
протоны	9.8—61.0 МэВ
альфа-частицы	37.0—246.0 МэВ

Телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф [2]. Блок детекторов содержит два идентичных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора и два сцинтиляционных детектора из кристаллов CsI(Tl). Основные характеристики телескопа показаны в табл. 9.

Телескоп низкоэнергичного γ -излучения RT-2 [6]. Для регистрации в приборе используются два составных сцинтиляционных детектора (фосфоры) 3-мм NaI(Tl)/25-мм CsI(Na) диаметром 11.7 см с коллиматорами 6° × 6° и 10° × 10°. Для исключения фона используется пассивная защита Cu/Sn/Pb и пластиковые антисовпадательные счетчики. В

Таблица 10. Основные характеристики телескопа RT-2

Мода	Энергетический диапазон, кэВ	Эффективная площадь, см ²	Энергетическое разрешение $\Delta E/E$	Временное разрешение, мс
Фосвич-мода	10—150	150	16.5 % (60 кэВ)	1 (0.1)
Спектрометрическая мода	100—2000	150	12 % (662 кэВ)	1 (0.1)
ППД	10—80	100	2 % (60 кэВ)	1 (0.1)

третьем детекторе используются детекторы на основе полупроводников кадмий-цинк-теллур (CZT). Основные характеристики телескопа приведены в табл. 10.

СБОР НАУЧНЫХ ДАННЫХ НА БОРТУ КА

Сбор, регистрация и накопление данных с научных приборов КНА ФОТОН осуществляется системой ССРНИ в виде цифровых массивов (ИЦМ) объемом по 960 бит. Скорости передачи каждого цифрового массива равны 62.5 или 125 кбит/с. Отдельный прибор может быть источником нескольких ИЦМ. Общее число ИЦМ равно 24. Распределение памяти между ИЦМ устанавливается в соответствии с квотами и может изменяться по командам. Общая информационная емкость долговременной памяти ССРНИ составляет 4 Гбит (512 Мбайт).

Кроме того, ССРНИ принимает и хранит телеметрическую информацию от бортовой телеметрической системы (БАТС). ССРНИ производит выдачу кода бортового времени и программных команд управления всем источникам цифровых массивов. Во время сеансов связи информация, накопленная в ССРНИ, передается со скоростью 7.68 Мбит/с на наземный приемный пункт по радиолинии на двух близких частотах диапазона 8.2 ГГц.

Блок управления и соединений (БУС-Ф) осуществляет подключение и отключение шин питания, преобразование и распределение команд управления, поступающих от бортовых систем (БКУ) к приборам КНА.

УПРАВЛЕНИЕ КНА

Функционирование КНА ФОТОН на борту КА КОРОНАС-ФОТОН можно описать следующим образом:

- при штатной эксплуатации все приборы работают непрерывно в соответствии с программой;

- с БКУ КА через БУС-ФМ и ССРНИ осуществляется управление работой научной аппаратуры с помощью функциональных команд и командно-программной информации;

- данные с приборов по их непосредственному запросу передаются и накапливаются в ССРНИ до момента заполнения выделенных индивидуальных информационных квот, после заполнения квот опрос приборов прекращается до момента сброса данных на наземный пункт приема;

- периодически один раз в четыре секунды служебная информация, поступающая с приборов КНА на бортовую аппаратуру телесигнализации, и служебно-навигационная информация с КА передаются бортовой управляющей машиной по мультиплексному каналу обмена в ССРНИ;

- два (четыре) раза в сутки данные из памяти ССРНИ поступают в бортовое устройство передачи данных и по радиолинии сбрасываются на наземный пункт приема, где информация декодируется, тестируется и по каналам интернет передается в Центр экспресс-обработки, накопления и хранения данных в МИФИ;

- от одного до нескольких раз в неделю, в зависимости от этапа проведения эксперимента, из ЦУПа на борт КА передаются разовые команды управления и КПИ, осуществляется контроль параметров орбиты и сверка и коррекция бортового времени КА.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ КОРОНАС-ФОТОН

Прототипом космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН служит КА МЕТЕОР-ЗМ. Принципиальным отличием является требуемая для КА КОРОНАС-ФОТОН одноосная ориентация: продольная ось аппарата должна быть постоянно направлена на Солнце. Основные параметры КА КОРОНАС-ФОТОН даны в табл. 11. Запуск будет осуществлен с космодрома г. Плесецк ракетой-носителем типа «Циклон 3-М».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметры космического аппарата и научной аппаратуры проекта КОРОНАС-ФОТОН позволяют:

- регистрировать электромагнитное излучение Солнца в диапазоне энергий от десятков электрон-вольт (приборы ТЕСИС и ФОКА) до нескольких гигаэлектрон-вольт (прибор НАТАЛЬЯ-2М);

- получать изображения диска Солнца в монохроматических линиях ионов высокотемпературной

Таблица 11. Технические характеристики КА КОРОНАС-ФОТОН

Параметр	Значение
Масса КА, кг	1900
Масса полезной нагрузки, кг	540
Резерв массы, кг	400
Напряжение электропитания, В	27
Обеспечение электропотребления научной аппаратуры:	
среднесуточное, Вт	400
максимальное (15 мин за виток), Вт	600
Точность ориентации продольной оси КА на центр диска Солнца	$\pm 5'$
Точность определения положения продольной оси КА относительно направления на центр диска Солнца	3'
Точность определения положения остальных осей КА	2—3°
Угловая скорость КА по каждой оси, град/с.	≤ 0.005
За время максимальной тени (≈ 36 мин) возможна потеря ориентации на Солнце на $10\text{--}12^\circ$.	
Это рассогласование ликвидируется при выходе из тени за 1-2 мин	
Точность определения местоположения КА на орбите:	
вдоль орбиты, м	± 1000
по высоте и в боковом направлении, м	± 500
Объем запоминаемой научной информации за сутки, Гбит	8.2
Объем информации, передаваемой за один сеанс связи, Мбит	2048
Орбита КА:	
тип	Круговая
высота, км	500
наклонение, град	82.5
Срок активного существования, год	3

плазмы с одновременным мониторингом ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения Солнца;

— измерять линейную поляризацию жесткого рентгеновского излучения и вести гамма-спектроскопию вспышечных областей;

— исследовать в околосземном пространстве химический и изотопный состав потоков заряженных частиц и проводить их пространственный и энергетический анализ;

— регистрировать рентгеновское и гамма-излучение дискретных источников и гамма-всплесков;

Таким образом, создаваемый космический комплекс позволит решить поставленные научные задачи.

Работы по проекту КОРОНАС-ФОТОН финансируются Росавиакосмосом в рамках Федеральной космической программы России.

1. Голенецкий С. В., Бурьян Ю. А., Дементьев И. В. и др. Эксперимент ГЕЛИКОН // Комплексные исследования Солнца и солнечно-земных связей. — Л.: ФТИ АН СССР, 1989.—С. 29—34.
2. Дудник А. В., Залюбовский И. И. Научные задачи международного космического эксперимента КОРОНАС-ФОТОН // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 3—12.
3. Котов Ю. Д., Архангельский А. И., Юров В. Н. и др. Характеристики спутникового прибора НАТАЛЬЯ-2М для регистрации нейтронов с энергиями выше 5 МэВ // Приборы и техн. эксперимента.—1999.—5.—С. 10—15.
4. Котов Ю. Д., Самойленко В. Т., Архангельский А. И. и др. Гамма-спектрометр для области энергий 0.3—2000 МэВ спутникового эксперимента ФОТОН // Приборы и техн. эксперимента.—1999.—5.—С. 30—36.
5. Kotov Yu. D., Dergachev V., Kruglov E., et al. Compton scattering polarimeter PENGUIN for solar flares polarimetry // Proc. of 27th Inter. Cosmic Ray Conf. — Munchen, 2001.—P. 2822—2825.
6. Kotov Yu. D., Nikolskij S. I., Yurov V. N., Damle S. V. Satellite project «Photon» for study of solar flare hard radiation // Proc. of the 24 Inter. Cosmic Ray Conf. — Rome, 1995.—Vol. 4.—P. 1263—1266.
7. Kotov Yu. D., Runtso M. F., Samoilenco V. T., et al. The Fast X-ray Monitor (FXM) of the PHOTON satellite project // J. Moscow Phys. Soc.—1996.—4.—P. 331—336.
8. Kotov Yu. D., Yurov V. N., Shtotsky Yu. V., et al. EUV-PHOKA-Multi-Channel Monitor for Measurements of Transmittance of Solar EUV-Emission in the Thermosphere // Phys. Chem. Earth (C).—2000.—25, N 5-6.—P. 465—469.

SCIENTIFIC OBJECTIVES AND INSTRUMENTS OF THE RUSSIAN SATELLITE PROJECT CORONAS-PHOTON

Yu. D. Kotov, V. N. Yurov, S. I. Boldyrev

The CORONAS-PHOTON mission is the third satellite of the Russian CORONAS program on solar activity observations. The primary scientific objectives of the project are the investigation of the processes of energy accumulation and its transformation to the energy of accelerated particles during solar flares and the study of the mechanisms of acceleration, propagation and interaction of fast particles in the solar atmosphere. We give the essentials of the Russian satellite project CORONAS-PHOTON developed in the framework of the Russian space program. The set of onboard scientific instruments will allow one to study the hard electromagnetic radiation of solar flares in a wide energy range from extreme UV up to high energy γ -radiation (~ 2000 MeV) as well as neutron and charge particle fluxes in the satellite orbit. The overview of observational objectives, the main parameters of the instruments and their interfaces with the satellite telemetry and command systems are presented. The launching of the satellite in a circular orbit with a height from 500 to 550 km and an inclination of 82.5° is planned for 2006.

УДК 520.6

А. И. Архангельский¹, Ю. Д. Котов¹, П. Ю. Чистяков²

¹Інститут астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету), Росія

²ТОВ «СКІНЕР», Москва, Росія

Цифровой процессор импульсных сигналов
для спектрометрии заряженных частиц,
нейтронов, рентгеновского и гамма-излучения

Розроблено швидкий цифровий процесор імпульсних сигналів для спектрометрії заряджених частинок, нейтронів, рентгенівського і гамма-випромінювання в широкому діапазоні енергії реєстрованих частинок. Прилад призначено для спектрометрії сигналів тривалістю 250—10000 нс із сцинтиляційних і напівпровідникових детекторів в умовах космічного експерименту. Робота цифрового процесора основана на неперервному оцифруванні миттєвих значень вхідного сигналу з частотою 40 МГц 12-роздрядним швидкодійчим АЦП, з наступною цифровою обробкою отриманої послідовності відліків спеціалізованим процесором в реальному часі та накопиченні спектральної інформації в банках пам'яті. Прилад вимірює амплітуду, площу імпульсів і необхідну часову інформацію (наприклад часову прив'язку до сигналів збігу/антисигналів від інших детекторів), здійснює ідентифікацію імпульсів, режекцію накладок і перегрузок засобом цифрової обробки оцифрованого профілю вхідного сигналу в реальному масштабі часу. Описуваний цифровий процесор імпульсних сигналів можна використати у будь-якій високопродуктивній вимірювальній системі, що має у складі інтерфейс з шиною ISA-8, по якій виконується керування приладом і змінання спектрометрної інформації.

Современная физика высоких энергий все чаще использует методы цифровой регистрации [2—5, 8] формы импульсов детекторов ионизирующих излучений для детального анализа формы сигналов, позволяющего получить наиболее полную информацию об изучаемых явлениях, недоступную аналоговым методам. Применение цифровой регистрации формы импульсов предоставляет наиболее точные и гибкие методы решения таких традиционных для физики высоких энергий задач, как спектрометрия потоков нейтральных и заряженных частиц, идентификация частиц по форме импульса, режекция наложений импульсов, а также «паразитных» сигналов имеющих характерные особенности формы импульса. До недавнего времени основным сдерживающим фактором для широкого внедрения подобных устройств являлись значительные трудности обеспечения их работы в режиме реального времени, обусловленные отсутствием быстродействующей элементной базы с низким энергопотреблением. Достигнутый в последнее десятилетие прогресс в области быстродействующей цифровой тех-

ники, появление на рынке недорогих АЦП и ПЛИС, работающих на частотах в десятки и сотни мегагерц, позволяет создавать недорогие, компактные устройства с низким энергопотреблением, основанные на чисто цифровых методах обработки сигнала. Данная работа посвящена созданию цифрового метода спектрометрии и идентификации частиц, пригодного как в лабораторных условиях, так и в условиях космического эксперимента.

В ходе работ в рамках российского космического проекта КОРОНАС-ФОТОН [1, 6] разработан цифровой процессор импульсных сигналов (ЦПИС) для спектрометрии заряженных частиц, нейтронного, рентгеновского и гамма-излучения в широком диапазоне энергии регистрируемых частиц. ЦПИС предназначен для спектрометрии сигналов длительностью 250—10000 нс с полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов (BGO, NaI, CsI, BaF₂), выполнен в конструктиве MicroPC Octagon Systems и может быть использован в любой измерительной системе, имеющей в составе интерфейс сшиной ISA-8, по которой производится управление

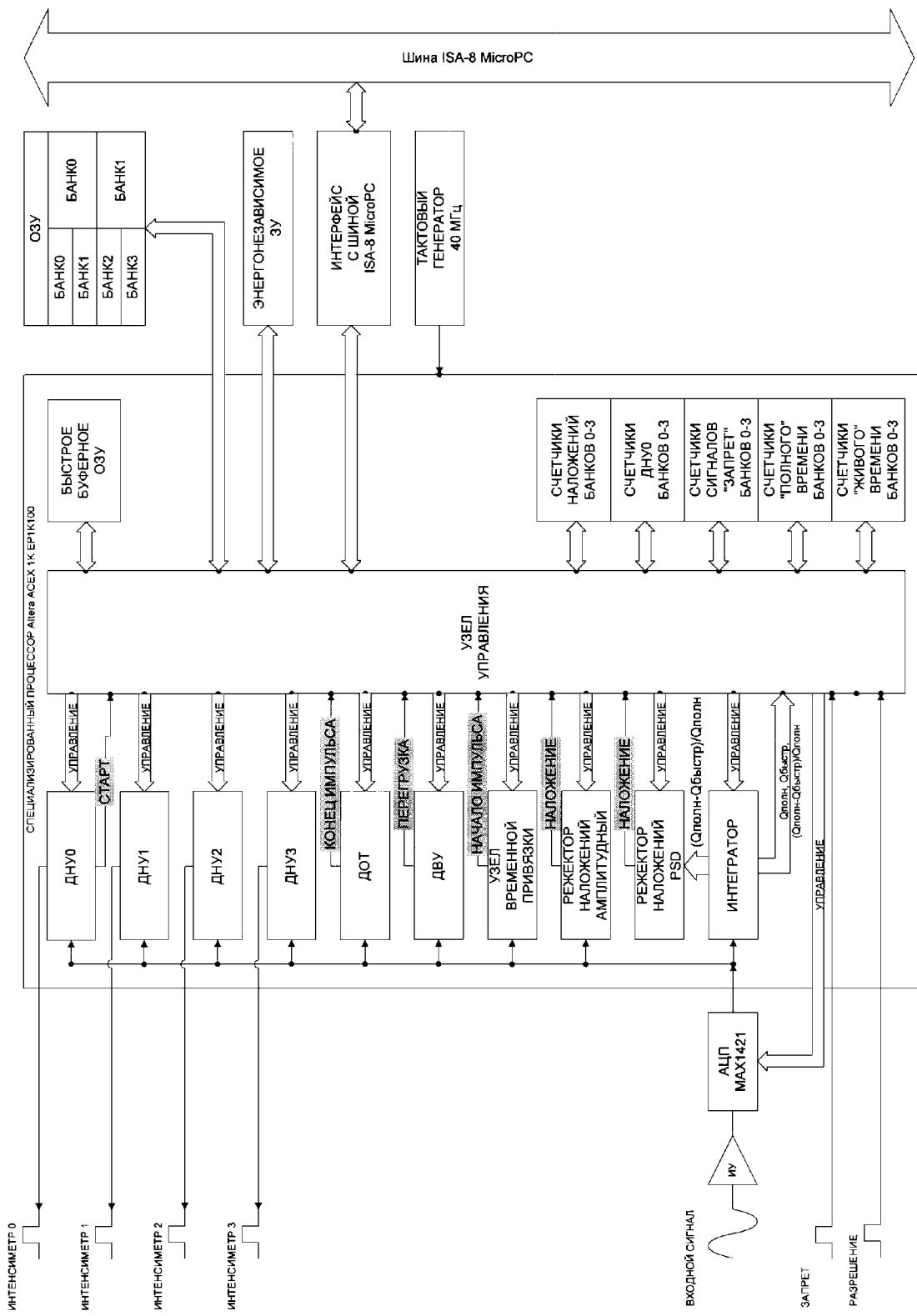


Рис. 1. Функциональная схема цифрового процессора импульсных сигналов. ДНУ0-ДНУ3 — дискриминаторы нижнего уровня, ДВУ — дискриминатор верхнего уровня, ДОТ — дискриминатор «отпускания», определяющий амплитуду, до которой должен снизиться уровень входного сигнала после обработки очередного импульса для возможности обработки следующего

устройством и съем спектрометрической информации.

Работа ЦПИС основана на непрерывной оцифровке мгновенных значений входного сигнала с частотой 40 МГц 12-разрядным быстродействующим АЦП Maxim MAX1421 с последующей цифровой обработкой полученной последовательности отсчетов специализированным процессором на основе ПЛИС EP1K100 семейства Altera ACEX 1K. Обработка проводится в реальном времени. Спектральная информация накапливается в ОЗУ устройства суммарной емкостью 64 килобайт/канал, организованном в виде набора (2 или 4) независимых банков памяти.

В состав ЦПИС входит два независимых спектрометрических канала. Каждый канал включает в себя (функциональная схема устройства приведена на рис. 1):

- инструментальный усилитель с изменяемым коэффициентом усиления;
- быстродействующий АЦП;
- специализированный процессор, осуществляющий дискриминацию и цифровое интегрирование входных импульсов, режекцию наложений и перегрузок, анализ формы импульса входного сигнала, формирование временных интервалов циклов набора спектров и заполнение банков памяти канала спектральной информацией. Процессор включает в себя, кроме того, узел управления, а также набор счетчиков, осуществляющих счет «живого» и полного времени набора, числа срабатываний дискриминаторов уровня сигнала, числа наложений и запрещающих сигналов управления;
- ОЗУ, в котором происходит накопление спектров (64 кБайт/канал);
- энергонезависимое ЗУ;
- интерфейс с шиной ISA-8;
- тактовый генератор частотой 40 МГц.

Управление работой ЦПИС осуществляется при помощи двух внешних логических сигналов отбора событий, а также путем записи 8 или 16-разрядных кодов в соответствующие регистры устройства, при этом возможна оперативная настройка порогов дискриминаторов, режекторов наложений и перегрузок, времени интегрирования входного сигнала, времени накопления спектров и ряда других параметров. Текущие значения всех настраиваемых параметров запоминаются в энергонезависимом ЗУ и автоматически заносятся в соответствующие управляющие регистры при включении питания цифрового процессора или при подаче соответствующей команды управления. Вывод спектральной информации из банков памяти, а также содержимого счетчиков устройства осуществляется пошине

Основные характеристики ЦПИС

Параметр	Значение
Количество каналов	2 однополюсных или 2 дифференциальных (устанавливается перемычками)
Полярность однополосного сигнала	положительная или отрицательная (устанавливается перемычками)
Максимальная амплитуда входных сигналов	однополюсный — $-10 \text{ В} / +10 \text{ В}$, дифференциальный — $\pm 10 \text{ В}$,
Рабочий диапазон входных сигналов	однополюсный — $-5 \dots 0 \text{ В} / 0 \dots +5 \text{ В}$ дифференциальный — $\pm 5 \text{ В}$
Входное сопротивление канала	10 кОм
Коэффициент усиления инструментального усилителя каналов	0.5, 1, 2, 5, 10
Разрядность измерительных АЦП модуля, бит	12
Интегральная нелинейность измерительных АЦП модуля, не более	0.5 младшего разряда
Дифференциальная нелинейность измерительных АЦП модуля, не более	0.5 младшего разряда
Частота выборки входного сигнала	40 МГц
Время обработки одного импульса, не более	1 мкс
Емкость одной ячейки спектра	8, 16, 24 или 32 бит (выбирается программно)
Число ячеек в спектре	128, 256, 512, 1024, 2048 или 4096 (выбирается программно)
Число внешних сигналов управления	2 («ЗАПРЕТ» и «РАЗРЕШЕНИЕ», уровни сигналов — ТТЛ, фронт 0.05—1.5 мкс, длительность 300—10000 нс)
Режекция наложений	Программная (амплитудная режекция и анализ формы импульса входного сигнала)
Режекция перегрузок	Программная
Размер ОЗУ модуля	128 кБайт (делится поровну между каналами)
Размер «быстрого» буферного ОЗУ модуля	6 кБайт (делится поровну между каналами)
Число управляемых таймеров в каждом канале	2
Число выходных логических сигналов в каждом канале	4
Число внутренних, программируемых доступных счетчиков в каждом канале	32-разрядных: 4 (счетчики «живого» времени) 24-разрядных: 12 (счетчики числа срабатываний ДНУ0, сигналов «ЗАПРЕТ» и срабатываний режектора наложений) 16-разрядных: 4 (счетчики полного времени)
Интерфейс модуля	Шина ISA-8 MicroPC
Число используемых аппаратных прерываний	1
Число каналов ПДП	1
Рабочий диапазон температур	0...+40 °C
Габаритные размеры	124.5 мм × 114.3 мм
Потребляемая мощность, не более	1.2 Вт

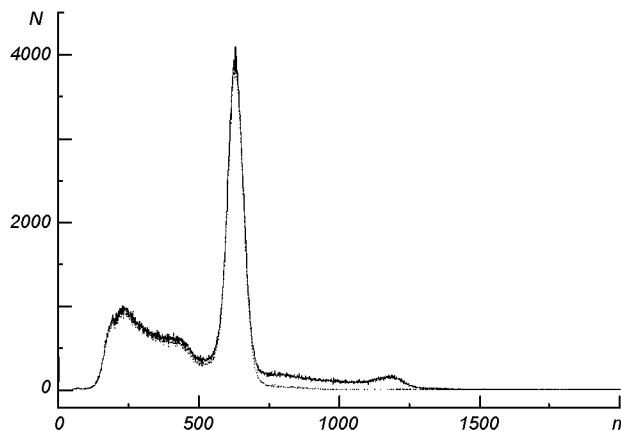


Рис. 2. Спектр источника ^{137}Cs , измеренный детектором на основе кристалла CsI(Tl) размером $36 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$ посредством ЦПИС. Постоянная интегрирования сигнала — 10 мкс. Время набора спектра 49.3 с, «живое» время 35.6 с.

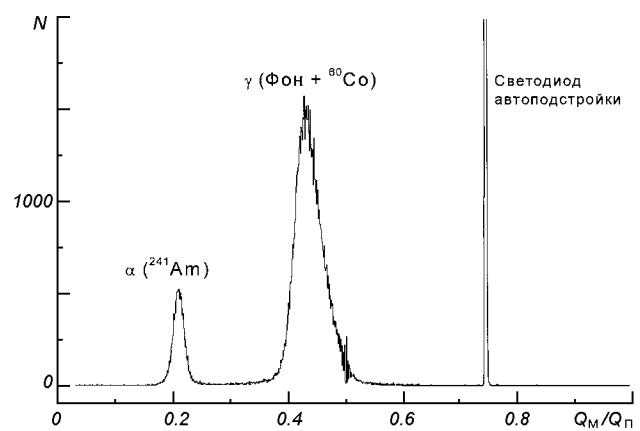
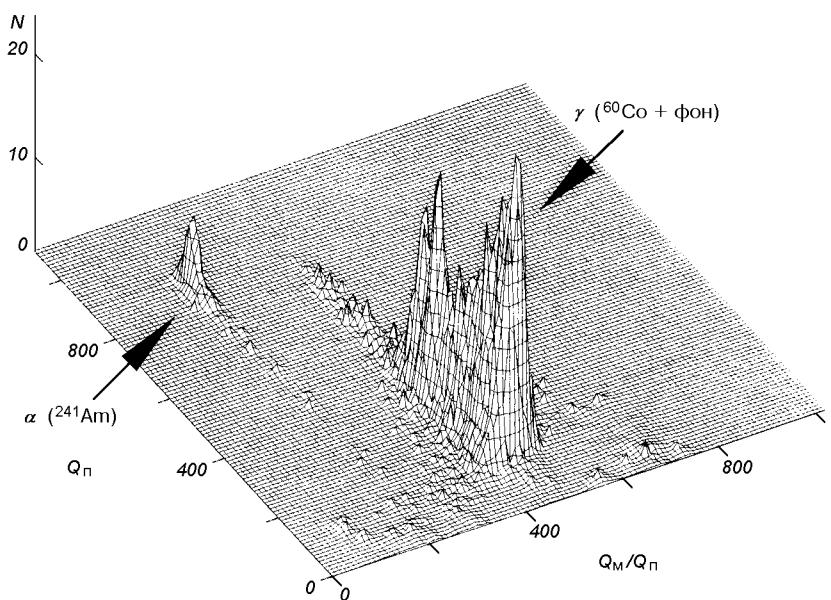


Рис. 3. Распределение импульсов на выходе детектора на основе 8 кристаллов CsI(Tl) размером $36 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$ по отношению медленной компоненты заряда к полному заряду для γ -квантов ^{60}Co и α -частиц ^{241}Am при выключенном режекторе перегрузок ЦПИС. Постоянная интегрирования полного заряда — 10 мкс, медленной компоненты заряда — 8 мкс

Рис. 4. Трехмерная диаграмма «отношение медленной компоненты заряда к полному заряду ($Q_{\text{медл}}/Q_{\text{полн}}$) — полный заряд ($Q_{\text{полн}}$)» при облучении детектора на основе CsI(Tl) γ -квантами ^{60}Co и α -частицами ^{241}Am , измеренная посредством ЦПИС



ISA-8 с использованием прямого доступа к памяти, при этом набор информации продолжается без потерь. Основные характеристики устройства приведены в таблице.

На рис. 2 приведен пример спектра источника ^{137}Cs , измеренного при выключенном (сплошная линия) и включенном (пунктир) режекторе наложений ЦПИС посредством системы, состоящей из управляющего контроллера, ЦПИС и детектора на основе кристалла CsI(Tl) размером $36 \text{ см} \times 8 \text{ см} \times 4.5 \text{ см}$, просматриваемого двумя ФЭУ-110 с противоположных сторон кристалла. Энергетическое разрешение системы составило 8 %

на линии 662 кэВ. Степень подавления наложений порядка 5 при входной загрузке системы 19.1 кГц.

На рис. 3 приведен пример использования ЦПИС в режиме отбора событий по форме сцинтиляционной вспышки в CsI(Tl). Измерения проводились посредством системы, состоящей из управляющего контроллера, ЦПИС и детектора на основе восьми кристаллов CsI(Tl) размером $36 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$, каждый из которых просматривался двумя ФЭУ-110 с противоположных сторон кристалла. В основе метода лежит наличие в световой вспышке, возникающей в кристалле CsI(Tl), двух компонентов с разными постоянными высыпчивания, причем отно-

шение интенсивности медленного компонента $Q_{\text{медл}}$ к полному заряду $Q_{\text{полн}}$ (или к быстрому компоненту высвечивания $Q_{\text{быстр}}$) зависит от удельной ионизации регистрируемых частиц [7]. Для отбора событий применялся метод цифрового интегрирования заряда на выходе детектора в течение двух различных временных интервалов. Полученные интегралы использовались в качестве оценок величин $Q_{\text{медл}}$ и $Q_{\text{полн}}$. На рис. 3 видно четкое разделение трех пиков от α -частиц ^{241}Am , γ -квантов ^{60}Co и сигналов светодиода системы автоподстройки, находящегося в оптическом контакте с кристаллом CsI(Tl). Степень разделения α -частиц и γ -квантов, оцененная по критерию

$$M = (A_\alpha - A_\gamma) / 0.5 \cdot (W_\alpha + W_\gamma),$$

где A_i и W_i — высота и FWHM пиков соответственно, составила $M = 3.26$.

На рис. 4 приведена трехмерная диаграмма ($Q_{\text{медл}}/Q_{\text{полн}} - Q_{\text{полн}}$) для тех же условий измерений. На диаграмме отчетливо видны области соответствующие α -частицам ^{241}Am и γ -квантам ^{60}Co (сигнал от светодиода системы автоподстройки исключен посредством режектора перегрузок ЦПИС с соответствующей установкой порога срабатывания), что свидетельствует о способности системы осуществлять надежную идентификацию частиц.

Разработанная методика и выполненное на ее основе устройство предоставляют возможность создавать компактные высокопроизводительные измерительные системы реального времени с низким энергопотреблением. Использование ПЛИС в качестве основного элемента осуществляющего обработку измеряемых сигналов позволяет производить гибкую перенастройку системы под условия конкретной задачи путем перепрограммированием ПЛИС без изменения конструкции устройства.

- Котов Ю. Д. Научные задачи российского спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН» // Третья Украинская кон-

ференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Кацивели, Крым, 2003.—С. 34.

- Мелешко Е. А. Быстродействующие цифровые регистраторы формы сигнала // Приборы и техн. эксперимента.—1997.—№ 1.—С. 5—26.
- Хрячков В. А., Дунаев М. В., Кетлеров В. В. и др. Новый метод разделения заряженных частиц с использованием кристаллов CsI(Tl) // Приборы и техн. эксперимента.—2000.—№ 3.—С. 29—37.
- Drndarevic V., Ryge P., Gozani T. Digital signal processing for high rate gamma-ray spectroscopy // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.—1989.—A277.—P. 532—536.
- Hilsenrath F., Voss H. D., Bakke J. C. A single chip pulse processor for nuclear spectroscopy // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1985.—NS-32, N 1.—P. 145—149.
- Kotov Yu. D. The scientific tasks and instruments of the PHOTON space project for the study of solar flares // J. Moscow phys. Soc.—1996.—6, N 4.—P. 311—315.
- Storey R. S., Jack W., Ward A. The Fluorescent Decay of CsI(Tl) for Particles of different ionisation density // Proc. Phys. Soc.—1958.—72, N 1.—P. 1—6.
- Yue Q., Lai W. P., Chang W. C., et. al. Effective dynamic range in measurements with flash analog-to-digital convertor // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.—2003.—A511.—P.408—416.

DIGITAL PULSE PROCESSOR FOR SPECTROMETRY OF CHARGED PARTICLES, NEUTRONS, X-RAY, AND GAMMA-RAY

A. I. Arkhangelsky, Yu. D. Kotov, P. Yu. Chistjakov

A high performance digital pulse processor is developed for spaceflight applications. A fully digital method for acquisition of spectra of charged particles, neutrons, and gamma-ray in a wide energy range was developed and tested. A fast 40 MHz digitizer is used to digitize pulses from scintillation and semiconductor detectors with decay times in a range of 250 to 10000 ns to 12-bit resolution on 25 ns intervals. Digital filtering, pulse searching and pulse shape discrimination algorithms are used to identify pulses, detect for pileup and pulse saturation. The pulse processor measures pulse height, pulse area, and the required timing information (e. g. multi detector coincidence). A pulse shape distribution is generated, corresponding to a conventional multichannel analyzer spectrum. Thanks to parallel digital architecture of the device, the interface is ISA-8 bus compatible. The fast real time pulse-processing algorithm will allow wide use of the technique described in high performance spectroscopy.

УДК 523.43

М. Л. Литвак¹, И. Г. Митрофанов¹, А. С. Козырев¹,
А. Б. Санин¹, В. И. Третьяков¹, В. Ю. Гриньков¹,
С. В. Чарышников¹, У. В. Бойnton²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Лунно-планетная лаборатория, Университет Аризоны, Тусан, Аризона, США

Поиск воды на Марсе на основе данных российского прибора ХЕНД, установленного на борту американского космического аппарата «2001 Марс Одиссея»

Подается концепция российского приладу ХЕНД, установленного на борту американского космического аппарата «2001 Марс Одиссея», а также результаты нейтронной спектроскопии поверхности Марса, полученные в ходе эксперимента. Проведены измерения позволяют оценить содержание воды в приповерхневом слое планеты толщиной 1–2 м. Показано, что на северо-западе Марса есть величезные районы «вичной мерзлоты» с очень высоким (несколько десятков процентов от массы) содержанием льда.

ВВЕДЕНИЕ

24 октября 2001 г. на орбиту вокруг Марса был успешно выведен американский межпланетный аппарат НАСА «2001 Марс Одиссея», стартовавший с мыса Канаверал 7 апреля 2001 г. В состав комплекса научной аппаратуры этого аппарата входят приборы для изучения состава поверхности Марса. Эта аппаратура включает детектор гамма-излучения, нейtronный спектрометр и российский прибор ХЕНД для регистрации нейтронов высоких энергий. Название прибора HEND (ХЕНД) образовано сокращением английского названия «High Energy Neutron Detector» [4].

Марс имеет тонкую атмосферу через которую свободно проникают частицы космических лучей бомбардирующие поверхность планеты. На глубине 1–2 м они производят быстрые нейтроны, которые, выходя на поверхность, производят гамма-излучение и формируют нейтронное альбедо Марса. Гамма-фон возникает из леса линий образующихся в результате реакций упругого и неупругого рассея-

ния нейтронов с ядрами породообразующих элементов [6, 7, 10]. Поэтому изучение спектра гамма-излучения позволяет определить химический состав приповерхностных слоев марсианского грунта. Для этого в комплексе аппаратуры используется гамма-детектор на основе высокочистого германия. Его спектральная чувствительность позволяет с высокой точностью разделять ядерные линии, принадлежащие различным химическим элементам. Чтобы точно оценить концентрацию различных химических элементов, необходимо знать величину нейтронного потока. Поэтому в комплексе аппаратуры включены также детекторы нейтронов разных энергий.

Построение карты нейтронного альбедо Марса является также одним из самых чувствительных методов для поиска воды в приповерхностных слоях марсианского грунта. Наличие даже нескольких процентов воды в приповерхностном слое планеты сильно влияет на поток быстрых нейтронов из-за высокой эффективности замедления нейтронов при столкновениями с ядрами водорода в молекулах воды. Чем выше содержание воды в грунте, тем

эффективнее замедляются нейтроны и тем сильнее ослабляется поток быстрых нейtronов при выходе на поверхность [6, 7, 10].

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА ХЕНД

Физическая концепция прибора ХЕНД была выбрана таким образом, чтобы найти приемлемый компромисс между ограничениями по весу (4 кг) и энергопотреблению (< 6 Вт) и чувствительностью детекторов, достаточной для однозначной интерпретации полученных результатов [11] (рис. 1).

Прибор ХЕНД состоит из нескольких детекторов, три из которых созданы на основе пропорциональных счетчиков нейтронов ${}^3\text{He}$, окруженных разными слоями замедлителя из полиэтилена. Эти счетчики регистрируют тепловые нейтроны в реакциях захвата ядрами изотопа гелия ${}^3\text{He}$ с образованием α -частицы и протона. В полетном варианте прибора использовались промышленные счетчики LND 2517.

Нейтроны замедляются в полиэтилене до тепловых энергий и регистрируются в пропорциональных счетчиках. Эффективность замедления в полиэтилене зависит от его толщины, поэтому детектор с самым толстым слоем замедлителя около 30 мм наиболее чувствителен к нейtronам с энергиями 10 эВ...1 МэВ. Детектор с толщиной замедлителя 14 мм имеет максимальную чувствительность в диапазоне энергий 10 эВ...100 кэВ. Наконец, пропорциональный счетчик, покрытый самым тонким замедлителем (3 мм), регистрирует в основном нейтроны с энергиями от 0.4 эВ до 1 кэВ. Объединяя данные со всех трех детекторов, можно получить информацию о потоке нейtronов в широком диапазоне энергий от 0.4 эВ до 1 МэВ.

Для регистрации нейtronов с энергиями выше 1 МэВ в приборе ХЕНД используется органический сцинтиллятор на основе стильбена. Этот сцинтиллятор регистрирует нейтроны высоких энергий по вспышкам света от протонов отдачи, которые выбиваются нейtronами из кристаллической решетки органического кристалла. Однако на орбите вокруг Марса стильбен регистрирует не только протоны отдачи от нейtronов, но также первичные протоны от космических лучей. Кроме этого, в стильбене будут регистрироваться электроны космических лучей и вторичные электроны, произведенные фотонами гамма-излучения.

Проблема разделения импульсов от протонов от импульсов от электронов была решена с помощью электронной схемы разделения на основе анализа формы сигнала от оптических вспышек, которые существенно различаются для этих частиц. В испы-

таниях прибора ХЕНД было показано, что схема обеспечивает достаточно эффективное разделение импульсов протонов от импульсов электронов. Возможный ошибочный учет электронного сигнала в качестве сигнала от протона соответствует вероятности на уровне $5 \cdot 10^{-4}$.

Проблема разделения протонов отдачи от первичных протонов космических лучей была решена методом антисовпадательной защиты с использованием дополнительного сцинтилляционного детектора из ScI. Он окружает детектор из стильбена со стороны «открытого неба», но оставляет открытыми те направления, где находится поверхность Марса. При прохождении заряженной частицы через внешний детектор в приборе вырабатывался логический сигнал *veto*, который запрещает в этот момент регистрацию импульса от внутреннего детектора.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Межпланетный КА «2001 Mars Odyssey» находится на круговой полярной орбите вокруг Марса со средней высотой над поверхностью планеты в 400 км и наклонением 87°. Орбита разбита на небольшие участки на каждом из которых производятся отдельные измерения. Длительность одного такого временного интервала составляет около 20 с, что соответствует пролету примерно 1° большой дуги. Полученные данные почти тут же передаются на Землю, где по интернету распределяются между различными научными центрами. Институт космических исследований РАН относится к числу таких научных центров, которые обладают правом получения научных данных в условиях, приближенных к режиму реального времени (задержка на пути радиосигнала от Марса к Земле может составлять до 15 мин). В ИКИ РАН приходят данные, зарегистрированные российским прибором ХЕНД.

Получение и обработку научной информации можно разделить на несколько этапов. На начальном этапе из полученного бинарного кода выделяется служебная и научная информация. При анализе служебной информации наибольшее внимание уделяется анализу параметров, отвечающих за жизнеобеспечение прибора, таких как температура блоков детектирования и электроники. Если какие-либо параметры выходят за пределы критических значений, то выдаются предупреждающие сообщения. Это позволяет вовремя среагировать на критическую ситуацию, и с помощью команд с Земли попытаться изменить состояние прибора. Научная информация распаковывается и сортируется в соот-

вествии с типом детектора, где она была получена. В случае ХЕНД это шесть независимых сигналов, два из которых представляют мягкое и жесткое гамма-излучение, а четыре других соответствуют нейтронным измерениям в разных диапазонах энергий. Завершается первый этап загрузкой полученной информации в базу данных.

На втором этапе запускается пакет программ, написанных на основе библиотеки SPICE, позволяющих определить местоположение космического аппарата и точное время каждого измерения (по шкале всемирного времени). Это дает возможность сопоставить полученную научную информацию с участком поверхности планеты, откуда она была собрана. По результатам вычислений в базу грузится около двадцати дополнительных параметров: координаты и скорость аппарата, углы на Солнце, Марс и Землю, метки времени и т. д. На этом завершается предварительная обработка полученной сырой информации.

На следующей стадии начинается собственно научный анализ данных. Сначала из данных происходит вычитание галактического нейтронного и гамма-фона. Для этого используются результаты полетных измерений и калибровок, проведенных на перелете от Земли к Марсу. Вычитание галактического фона на орбите вокруг Марса производится в результате коррекции полученных фонов на перелете на угловой размер Марса с орбиты в 400 км. После этого полученный сигнал в разных детекторах ХЕНД раскладывается по отдельным пикселям на поверхности Марса. Это позволяет получить карты нейтронного альбедо Марса на высоте в 400 км в разных энергетических диапазонах. На этом этапе обработки единицей измерения нейтронного потока является отсчет в секунду, что не вполне отражает физическую картину, так как является приборно зависимой величиной. Поэтому следующий этап обработки научной информации включает учет функций отклика разных детекторов и переход от отсчетов к физическим единицам измерений выраженных в нейтронах в секунду на квадратный сантиметр. Полученные таким образом орбитальные карты нейтронных потоков являются базовым продуктом для дальнейших физических интерпретаций. Так, учитывая атмосферу Марса, можно перейти от орбитальных измерений к приповерхностным нейтронным потокам. А в дальнейшем анализе данных с учетом возможных моделей марсианского грунта можно оценить распределение воды в приповерхностном слое грунта. Подробнее интерпретация данных будет рассмотрена ниже.

Орбитальные карты нейтронных потоков вместе функциями откликов детекторов являются основ-

ным научным продуктом, представляемым на суд научной общественности. Согласно общепринятым правилам данные каждой американской межпланетной миссии выкладываются в публичный доступ в интернет [14]. На сегодняшний момент после почти двухлетней работы КА на орбите вокруг Марса на интернет-сайты выложены сырье данные, накопленные за год работы. В конце декабря 2003 г. в публичную базу данных предполагается выложить обработанную научную информацию за первый год работы. В случае эксперимента ХЕНД это будут орбитальные карты потоков (нейtron/ $\text{см}^2\text{с}$) в разных диапазонах энергий. Эта поставка данных также будет продублирована на российском сайте эксперимента ХЕНД в январе 2004 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Предварительная обработка данных эксперимента ХЕНД показала наличие больших областей на поверхности планеты, где наблюдается значительная депрессия эпитетловых нейтронов (0.4 эВ — 1 МэВ) по отношению к экваториальным областям с максимальным потоком нейтронов [3, 8, 12]. Прежде всего это огромные области вокруг полюсов планеты, находящиеся выше 60° с. ш. и 60° ю. ш. (см. рис. 2). Уменьшение потока эпитетловых нейтронов в этих областях составило около 10 раз, что не может быть объяснено статистическими флуктуациями, изменением состава грунта или ослаблением в атмосфере. Эти эффекты могут привести к вариациям потока нейтронов на уровне не более 15—20 %. В данных GRS было обнаружено, что найденные области являются также источником излучения в гамма-линии 2.2 МэВ, которая возникает при захвате нейтрона водородом [5]. Интерпретация полученных фактов привела к однозначному выводу о том, что приполярные районы Марса представляют собой «вечную мерзлоту» с содержанием водяного льда в десятки процентов по весу [5, 8, 12].

Кроме приполярных областей, были также обнаружены две небольшие области неправильной формы с дефицитом эпитетловых нейтронов 5-7 раз в экваториальных широтах Марса в районе областей Аравия и Мемнония. Наличие водяного льда на этих широтах является труднообъяснимым фактом, поэтому наблюдаемый дефицит эпитетловых нейтронов объяснялся наличием химически связанной воды [1].

Чтобы от наблюдательных данных перейти к точным оценкам содержания воды в грунте, необходимо построить численную модель грунта и марсианской атмосферы. Используя предложенные мо-

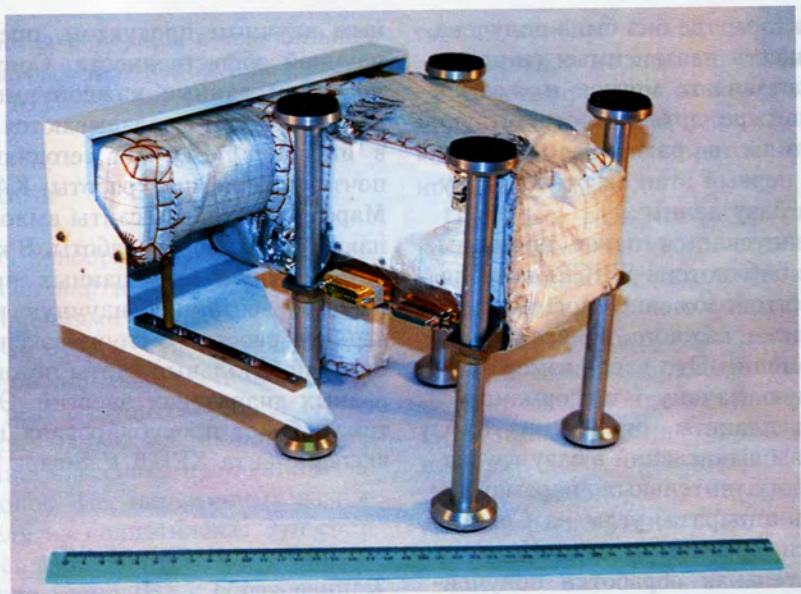


Рис. 1. Летний образец прибора ХЕНД

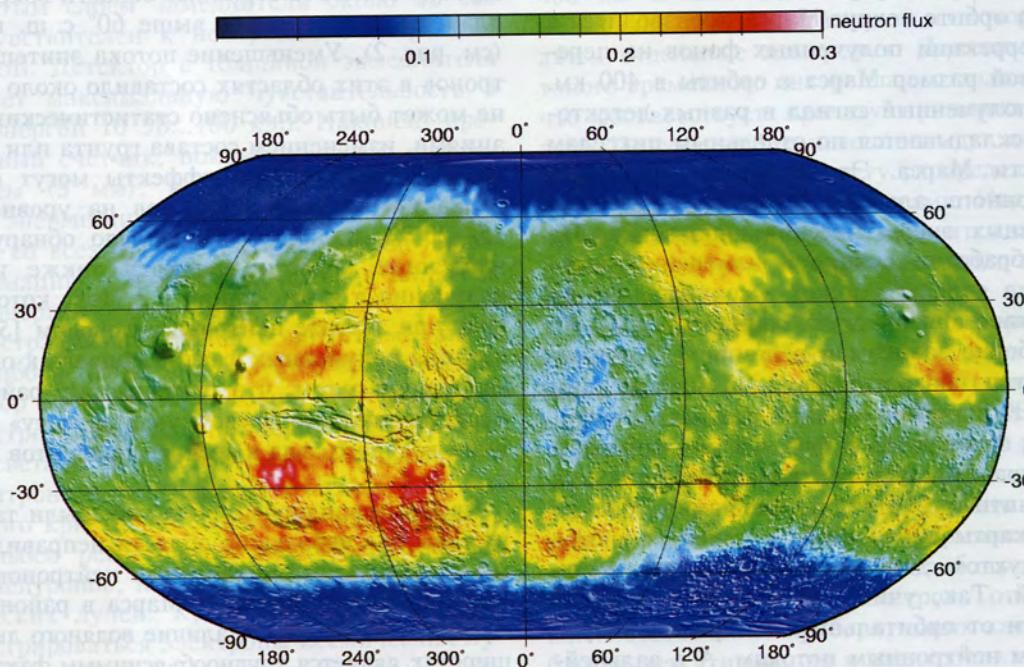


Рис. 2. Карта орбитальных измерений потока эпитепловых нейтронов от Марса. При построении карты использованы летные измерения для каждого из полушарий планеты. Поэтому представленное распределение нейтронов отражает свойства поверхности свободной от сезонного покрова CO_2

дели с различным содержанием воды, можно вычислить нейтронный поток на орбите вокруг Марса и сравнить его с наблюдательными данными. Такие расчеты были проведены для различных районов марсианской поверхности. В качестве модели атмосферы брался слой, состоящий из газообразного CO₂ с эффективной толщиной 5—25 г/см². Для модели грунта использовалась слоистая структура, состоящая из верхнего относительно сухого слоя переменной толщины с содержанием воды около 2 % и нижнего полубесконечного слоя, в котором содержание воды варьировалось от единиц до десятков процентов. Была построена специальная процедура минимизации для поиска оптимальных параметров, описывающих содержание воды и глубину ее залегания при которых достигается наилучшее согласие между наблюдательными данными и модельными вычислениями.

Расчеты показали, что в северных приполярных областях на небольшой глубине 5—10 см находится в среднем от 15 % (60° с. ш.) до 70 % (80° с. ш.) воды по массе. В районе остаточной полярной шапки содержание водяного льда может даже достигать почти 100 %. Южные приполярные районы отличаются от северных по распределению воды в приповерхностном слое. Во-первых, процент содержания воды на юге чуть меньше, чем на севере, а во-вторых — водяные пласти находятся на гораздо большей глубине: от 15 см на самом полюсе до 40 см на границе областей вечной мерзлоты.

Численное моделирование нейтронных потоков было также проведено для экваториальных областей, где был обнаружен существенный дефицит эпитетловых нейтронов. В этих областях содержание воды в среднем оценивается в 7—10 %, что согласуется с предсказаниями о том, что вода может находиться здесь в химически связанной форме в различных глинах. Однако предварительный анализ наиболее влажных мест внутри экваториальных районов показал, что минимальное содержание воды там может доходить до 12—15 % [13]. Это предельные значения которые можно объяснить наличием химически связанной воды. Если дальнейший анализ данных покажет еще большее количество воды, необходимо будет привлекать гипотезы о наличии водяного льда в экваториальных широтах.

Кроме поиска воды данные ХЕНД можно использовать для мониторинга сезонных шапок Марса. Известно, что каждой полярной осенью на высоких широтах начинает происходить конденсация углекислого газа из атмосферы. Этот процесс продолжается до глубокой зимы, приводя к образованию снежного покрова толщиной до 1 м [15]. Ранней

весной начинается обратный процесс и к середине лета снежный покров полностью испаряется обратно в атмосферу. Благодаря тому, что приполярные районы, подверженные сезонным осадкам, содержат большое количество водяного льда, появляется возможность следить за изменением толщины снежного покрова на основе данных ХЕНД. Даже небольшой толщины снежного покрова в 5—10 см уже достаточно, чтобы экранировать грунт, обогащенный водяным льдом [2]. В орбитальных наблюдениях это проявляется как увеличение нейтронного потока. Чем больше толщина сезонных отложений атмосферной углекислоты, тем сильней растет величина нейтронного потока. Привлекая численное моделирование, можно из наблюдательных данных извлечь эффективную толщину (г/см²) снежного покрова, а вместе с ней — и его массу для разных приполярных районов [9]. По результатам наблюдений были сделаны предварительные оценки массы сезонных шапок Марса. Полная масса северной сезонной шапки составляет около $4 \cdot 10^{15}$ кг, южной — около $7 \cdot 10^{15}$ кг.

Подводя итоги, можно сказать, что концепция прибора ХЕНД была выбрана почти оптимальным образом. Это позволило получить максимум научных результатов при серьезных технических ограничениях, вызванных работой на межпланетном космическом аппарате. Содержание воды в приповерхностном слое Марса может быть полностью изучено только при достаточно продолжительных наблюдениях планеты, когда будет возможно исключить эффекты, связанные с переменностью потока нейтронов из-за сезонных покровов углекислоты. С другой стороны, изучение этой сезонной переменности нейтронного излучения Марса позволяет построить физическую модель сезонной циркуляции углекислоты в атмосфере и на поверхности Марса. Для получения достоверных результатов желательно продолжать миссию «2001 Марс Одиссей» еще 2-3 марсианских года.

1. Базилевский А. Т., Литвак М. Л., Митрофанов И. Г. и др. Поиски следов химически связанный воды в поверхностном слое Марса по результатам измерений прибором ХЕНД на КА «2001 Mars Odyssey» // Астрон. вестн.—2003.—№ 5.
2. Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Козырев А. С. и др. Сезонные вариации потока нейтронов в области полярных шапок Марса по данным российского прибора ХЕНД проекта НАСА «2001 Mars Odyssey» // Астрон. вестн.—2003.—№ 5.
3. Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Козырев А. С. и др. Первые результаты картографирования потока нейтронов от Марса российским прибором ХЕНД на борту американского аппарата «2001 Mars Odyssey» // Астрон. вестн.—2003.—№ 5.
4. Boynton W. V. The Mars Odyssey gamma-ray spectrometer

- instrument suite // Space Sci. Rev.—2003.—Accepted.
5. Boynton W. V., Feldman W. C., Squyres S. W. et al. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits // Science.—2002.—297.—P. 81—85.
 6. Drake D. M., Feldman W. C., Jakosky B. M. Martian neutron leakage spectra // J. Geophys. Res.—1988.—93.—P. 6353—6368.
 7. Feldman W. C., Boynton W. V., Jakosky B. M., et al. Redistribution of subsurface neutrons caused by ground ice on Mars // J. Geophys. Res.—1993.—98.—P. 20855—20870.
 8. Feldman W. C., Boynton W. V., Tokar R. L., et al. Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // Science.—2002.—297.—P. 75—78.
 9. Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Kozyrev A. S., et al. 4-D Model of CO₂ deposition at north and south of Mars from HEND/ODYSSEY and MOLA/MGS // 6th Inter. conf. on Mars. — Pasadena, 2003.—Abstract N 3080.
 10. Masarik J., Reedy R. C. GAMMA ray production and transport in Mars // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 18891—18912.
 11. Mitrofanov I. G., Anfimov D. S., Boynton W. V., et al. Russian High Energy Neutron Detector HEND for Mars Surveyor Orbiter 2001 Mission // LPSC XXX.—1999.—Abstract N 1550.
 12. Mitrofanov I. G., Anfimov D. S., Kozyrev A. S., et al. Maps of subsurface hydrogen from High Energy Neutron Detector // Science.—2002.—297.P. 78—81.
 13. Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Kozyrev A. S. et al. Vertical distribution of shallow water in the distinguishable regions at low and high latitudes of Mars: Neutron data deconvolution of HEND // 6th Inter. conf. on Mars. — Pasadena, 2003.—Abstract N 3080.
 14. Slavney S., Arvidson R. E., Guinness E. A. Mars Global Surveyor and 2001 Mars Odyssey Science Data Archives // LPSC XXXIII.—2002.—Abstract N 1303.
 15. Smith D. E., Zuber M. T., Neumann G. A., et al. Seasonal Variations of Snow Depth on Mars // Science.—2001.—294.—P. 2141—2146.
-
- A SEARCH FOR WATER ON MARS FROM DATA
OF THE RUSSIAN DEVICE HEND INSTALLED ABOARD
THE AMERICAN SPACE MISSION “2001 MARS ODYSSEY”**
- M. L. Litvak, I. G. Mitrofanov, A. S. Kozyrev,
A. B. Sanin, V. I. Tret’iakov, V. Yu. Grinkov,
S. V. Charyshnikov, U. V. Bointon**
- We give the conception of the Russian device HEND installed aboard the American space mission “2001 Mars Odyssey” and some results of neutron spectroscopy of the Martian surface derived from the experiment. The measurements performed allow one to make an estimate of the water content of a 1–2 m thick near-surface layer of Mars. It is shown that, in the north and south of Mars, there are huge regions of permafrost with a very high (several tens of percent by weight) content of the water ice.

УДК 519.815

В. О. Яценко¹, Т. Ф. Бекмуратов⁷, П. І. Бідюк², В. Бойко³, С. Д. Живило¹,
Х. М. Ісмаїлі⁷, В. В. Козоріз⁴, О. В. Козоріз⁵, В. М. Кунцевич¹, О. М. Набієв⁷,
А. М. Негрійко⁶, Н. Плішко¹, О. К. Черемних¹, Л. П. Яценко⁶

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет», Київ

³Інститут математики Національної академії наук України, Київ

⁴Київська державна академія водного транспорту

⁵University of Toledo, College of Engineering, Department of Electrical Engineering and Computer Science Ohio, USA

⁶Інститут фізики Національної академії наук України, Київ

⁷Науково-дослідний інститут «Алгоритм—Інженірінг» АН Узбекистану

Розробка кріогенно-оптичного датчика для високочутливих гравітаційних вимірювань

Представлено нова концепція кріогенно-оптичного датчика, що заснована на конкурентоздатному адаптивному чутливому елементі. Основою датчика є новий феномен магнітної левітації, високоточна оптична реєстрація координат левітуючого пробного тіла та робастна система обробки сигналів. Розглядається проблема врівноваження сил гравітації, що діють на вільне тіло, магнітними силами таким чином, щоб рівновага відносно всіх шести степенів свободи вільного левітуючого тіла була стійкою.

ВСТУП

На сьогодні дистанційне зондування є однією з технологій, що швидко розвиваються. Це індустрія рівня багатьох мільярдів доларів, а кількість віддалених тематичних зображень в різних ділянках постійно зростає. Вирішення багатьох практичних проблем залежить від широкомасштабного використання вимірювальних систем та принципів, на яких вони функціонують. Ці проблеми включають моніторинг природних ресурсів на основі аналізу гравітаційних аномалій, вивчення глобальних геодинамічних процесів, гравітаційного поля Землі, руху полюсів Землі та ін. Детальна інформація про гравітаційне поле Землі необхідна багатьом галузям та прикладним наукам (геологія, навігація, наука про форму Землі та ін.). Гравіметр — це тонкий інструмент [1—3, 5, 6] для вимірювань прискорення вільного падіння g . Похибка найкращих сучасних стаціонарних гравіметрів складає $10^{-8} g$, морських — $10^{-7} g$, авіаційних — $10^{-6} g$.

Дослідження надпровідної магнітної левітації, відомої як «магнітна потенціальна яма» (МПЯ), стартивало в Україні наприкінці 1960-х як внаслідок розвитку низькотемпературної прикладної надпревідності, теорії електромеханічного перетворення енергії та методів теорії керування. Цей напрям визначає левітацію як стійку рівновагу надпровідного кільця чи іншого позбавленого електричного опору замкнутого витка без контакту з іншими тілами на основі використання магнітних сил [3, 4].

Метою даної роботи є викладення нового підходу до розробки чутливого елемента і методу оцінки гравітаційного сигналу на основі програмного забезпечення, яке здатне реалізувати цей метод при наявності шумів. Наша розробка орієнтована на точність $10^{-10} g$. Такий чутливий елемент та програмне забезпечення можуть бути використані для аналізу геодинамічних процесів. Крім того, накопичення експериментальних даних, отриманих для різних умов, є важливим для розвитку майбутніх методів.

КОНЦЕПЦІЯ КРІОГЕННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА

Основою супервисокої потенційної точності майбутнього гравіметра є ефект левітації МПЯ [3—5], що функціонує при нульовому електричному опорі, і тому в системі підвісу чутливої маси принципово немає тертя. На основі отриманих попередніх досліджень в галузі МПЯ-левітації розвинено методи отримання математичних моделей динаміки вільного тіла в магнітному полі короткозамкнутих надпровідних витків та їх аналізу на стійкість на основі теорем типу Ляпунова для різних варіантів геометрії надпровідних струмонасучих елементів. В результаті аналізу на стійкість отримані області в просторі параметрів, які гарантують стійкість магнітної левітації та оптимізацію магнітних і геометричних параметрів на основі теорії без використання вартісних та довготривалих експериментів [4].

Ці результати стали основою розробки конструкції надпровідного гравіметра та обладнання для здійснення гравітаційного експерименту. Були проаналізовані спрощені динамічні моделі вільної маси, вивчені питання взаємного зв'язку коливань в напрямку різних лінійних та кутових координат вільної маси. Досліжені питання режимів підвіски, близьких до критичних, коли можливе руйнування надпровідного стану критичними струмами. Проаналізовані можливості використання магнітолевітаційних ефектів високотемпературної надпровідності для гравіметра.

Найефективніше використання переваг систем з магнітною підвіскою, що мають практично необмежену чутливість, вимагає відповідної системи реєстрації вимірювань зміщення пробного тіла. У чутливому елементі положення пробного тіла визначається за допомогою лазерного сенсора. Це дозволяє виключити можливі збурення положення пробного тіла електричними та магнітними полями на відміну від звичайних сенсорів, що використовувалися у попередніх системах.

Сучасні інтерферометричні методи та динамічні ефекти у лазерній генерації, викликані слабкими зовнішніми сигналами, використовуються для детектування надмалих переміщень пробного тіла. Були відібрані та реалізовані експериментальні схеми з лазерними детекторами зміщення, які забезпечують вимірювання зміщення пробного тіла та перетворення сигналу у цифрову форму для подальшої математичної обробки.

Основним результатом робіт, спрямованих на розробку оптичної системи вимірювань малих зміщень пробного тіла, є висновок про те, що для оптичного вимірювання координат пробного тіла необхідно застосувати інтерферометричний метод, який потенційно може забезпечити точність ви-

мірювання координат пробного тіла не гірше від 10 нм. За попередніми оцінками цього достатньо для досягнення необхідної чутливості датчика. Розроблено функціональну схему оптичного датчика на основі діодного лазера з зовнішнім резонатором як джерела монохроматичного випромінювання та одномодового оптоволокна як каналу транспортування світла до пробного тіла зі збереженням когерентності оптичного випромінювання.

Запропоновано системний підхід до вивчення та оптимізації нелінійної динаміки надпровідної пробної маси. Цей підхід можна використати при створенні гібридного програмного забезпечення, що оцінює динамічні характеристики вихідного оптичного сигналу. На додаток, щоб створити модельючу програму, яка використовує існуючу інформацію, що може бути інтерпретована динамічно, ми пропонуємо техніку, засновану на комбінації нелінійної динаміки, глобальної оптимізації та нелінійного оцінювання. Ми називаемо такий підхід системним.

Отримані необхідні попередні умови для аналізу можливостей реалізації стійкої підвіски вільної маси на основі магнітної взаємодії між двома струмовими кільцями нульового електричного опору як моделями надпровідних магнітів, оперуючих в режимі незатухаючого струму. Була запропонована нова постановка проблеми побудови математичної моделі левітації. Вона сформульована як проблема необхідних та достатніх умов стійкості рівноваги для консервативної нелінійної динамічної системи з вільним тілом. Теорію таких динамічних систем вперше розробив В. В. Козоріз [3]. Розглядувана динамічна система знаходиться під дією сил ваги, магнітних сил та моментів сил, що згенеровані нерухомими струмонасучими елементами та такими ж елементами на вільному тілі, а також іншими силами, які вважаються малими по відношенню до названих.

Ключовим елементом силової взаємодії є замкнений виток нульового електричного опору як модель магніту. Короткозамкнений виток нульового опору має добре відому властивість зберігати повний магнітний потік (магнітне потокозчеплення), що зв'язане з цим витком. Кажуть, що повний потік заморожений. Високий ступінь ідеальної електропровідності досягається в надпровідниках. Якщо опір надпровідника і не є строгим нулем, однак різниця опорів у надпровідному і нормальному станах більша, ніж різниця опорів міді і найкращого ізолятора.

Але надпровідник — це не тільки ідеальний електропровідник, що має нульовий електричний опір ($\rho = 0$). Він також є ідеальним діамагнетиком ($\mu = 0$). Прояв цих двох макроскопічних властивостей надпровідності залежить від форми тіла та обмежений критичними температурами і критич-

ними магнітними полями. Якщо рівень поля нижче критичного, і зразок має форму однозв'язної області (просторово подовжене тіло ненульового об'єму, що не має «дірок» для проникнення магнітного поля), то проявляється лише ідеальний діамагнетизм. З іншого боку, якщо надпровідник має форму замкненого витка, і відношення між його товщиною та поздовжнім характерним розміром наближається до нульового значення, то властивості такого зразка повністю визначаються його нульовим опором і не залежать від діамагнетизму.

Модель магніту, вибрана нами, залежить тільки від ідеальної електропровідності та її прояву у зразках типу тонкий замкнений виток. Вона не залежить від діамагнетизму надпровідника в тому сенсі, щоб на підставі ефекту Браунбека досягти стабільності вільного стану. Це визначається тим, що товщина витків можна знештувати. Якщо такий виток перебуває у стані надпровідності, але його мала частина переведена в нормальній стан, він не проявляє діамагнітних властивостей. Більше того, він взагалі немагнітний. Якщо стан ідеальної електропровідності згаданої частини відновлено, та-кий виток продовжує демонструвати недіамагнітні властивості, оскільки останні залежать від об'єму зразка, який в нашому наближенні є нульовим. Тому ми повинні зробити висновок, що не існує можливості забезпечити стійку рівновагу вільного стану на основі принципу Ірншоу—Браунбека, єдиного відомого і строго обґрунтованого принципу магнітної левітації. Проте розглядувана нами модель проявляє властивості зберігати незмінним повний магнітний потік як будь-який виток нульового електричного опору. Постійність потокозчеплення залишається в силі незалежно від будь-яких змін положення розглядуваного витка з $\rho = 0$. Остання умова може бути реалізована умовами надпровідності.

Наявність нульового опору — це лише один місточок, що пов'язує нашу модель з надпровідністю.

Необмежена кількість надпровідників у формі замкненого витка нульового електричного опору з'явилася після відкриття Кунцлером аномально великих густин струму у сполуках типу Nb_3Sn в 1961 р. Критичні поля для цього матеріалу складають 24.5 Тл при $T = 0$ К, а для $NbTi$ — 14 Тл. Такі рівні поля стали основою появи маси магнітів різних розмірів та форм, що здатні генерувати і оперувати в магнітних полях рівня 10—20 Тл. Тому модель замкненого витка нульового електричного опору придатна для низькотемпературних магнітів, що оперують в режимі незатухаючого струму. Ця модель можлива також в застосуванні до високотемпературних надпровідників за умови

проникнення магнітного поля і якщо такий матеріал може бути представлений як набір витків нульового електричного опору. Нарешті, недавнє відкриття фуллеренів та їхньої здатності проводити незатухаючі струми і заморожувати магнітне потокозчеплення у високих магнітних полях фіксує придатність нашої моделі магніту і до такої субстанції, якщо вона може бути виготовлена у вигляді замкненого витка.

Варто зауважити, що наша модель не враховує квантування магнітного потоку, що суттєво для надпровідної електроніки, оскільки розглядаються сильнострумові застосування. Ми спрощуємо також картину проникнення поля в зразок типу »замкнений виток» та розглядаємо магнітне поле та струм зосередженими на невеликій глибині матеріалу витка. Глибина проникнення λ вважається на рівні лондонівської глибини проникнення (40—60 нм). Ця обставина приводить до різних формул для внутрішньої індуктивності, відповідальної за поле всередині провідника. Поля витків ідеальної електропровідності та надпровідного відрізняються полем всередині витків. Різниця зникає, коли параметр $\tau = d/a$ (параметри d та a є відповідно товщина та характерний розмір витка) прямує до нуля. Саме такий випадок ми і вивчатимемо.

На основі теоретичних досліджень МПЯ-левітації, обмежень на «магнітну геометрію» підвіски, отриманих на основі достатніх умов стійкості та викладених вище, були розроблені декілька варіантів конструкції робочої моделі підвісу. Робоча модель враховує також простоту виготовлення і водночас мінімальні кошти на це. Тому частина підвіски робочого макету запропонована у двох варіантах. В одному з них за нерухоме джерело магнітного поля вибрано постійний магніт. Це спрощує виготовлення та забезпечення умов прояву МПЯ для отримання стійкості підвіски, оскільки виключає потребу в теплових ключах.

СИСТЕМА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Функціональна структура системи обробки сигналів складається з адаптивного компенсатора, адаптивного калманівського та цифрових фільтрів, оцінювачів на основі оберненої динамічної моделі та показників Ляпунова, нейромережі, системи, що моделює динаміку пробного тіла та бази даних. Оригінальність підходу до обробки сигналів визначається засобами, що інтегрують оцінювання гравітаційного збурення з моделями обробки даних. Система обробки сигналів включає підсистему взаємодії ядра програми з базою даних, а також з алгоритмами для її взаємодії з зовнішнім сенсором

і моделями оцінки сигналів. Вона забезпечує також послідовне включення програмних модулів, що можуть бути розроблені на основі Matlab. Були передбачені спеціальні засоби для суттєвого зменшення рівнів внутрішніх та генерованих світлом шумів на основі використання особливостей оперування детектора і програмного забезпечення.

Проведено аналіз характеристик інтенсивності шуму оптичного вимірювача координат з метою використання його результатів при розробці чутливого елементу. Було отримано кореляційну функцію та спектральну щільність щуму з урахуванням властивостей полосової фільтрації в інтерферометрі і довільної модуляції хвильового фронту. Аналіз включав модуляцію дробового шуму як спеціального випадку шуму інтенсивності. Для детектування обмеженого дробовим шумом сигналу було знайдено відношення сигнал/шум як функції модуляційних параметрів і описана процедура оптимізації відношення сигнал/шум по відношенню до демодуляції сигналу. Запропоновано алгоритм компенсації шуму, який базується на глобальній оптимізації. Цей компенсатор має можливість отримувати корисну інформацію з зашумленого оптичного сигналу. Інформаційний сигнал являє собою оптичний сигнал, який спотворено аддитивним гауссівським шумом. Система компенсації шуму припускає використання двох типів сенсорів. Первінний сенсор формує зашумлений вихідний сигнал. Другий сенсор вимірює шум, який некорельюваний з корисним сигналом і корельюваний з шумом у первинному сенсорі.

Розроблено нейромережні алгоритми аналізу сигналів та оцінювання гравітаційних збурень на основі інформаційного підходу. Досліджено похибку ентропійно-мінімізаційного підходу до ідентифікації динаміки пробного тіла. Вивчено ефект впливу часового вікна Парсена на пошук мінімуму ентропії. Аналітично показано, що мінімум ентропії може бути локальним, в той же час глобальний мінімум непараметричного оцінювання ентропії може бути знайдено на основі використання інформації по Шенону та гауссівських ядер. Проведено порівняльний аналіз мінімізації ентропії похибки та мінімізації ентропії середньої квадратичної похибки стосовно короткочасового прогнозу експериментальних даних. Статистичні властивості похибки оцінювання центральних моментів високого порядку експериментальних часових рядів та прогнозування використовуються як критерії порівняння. Розроблено математичний опис нової структури нейромережі інгібіторного типу, яка складає важливий клас нейромереж. Розглянуто і визначено необхідні умови стійкості поведінки компетитивної інгібіторної нейромережі (КІНМ) та розроблено

алгоритм, що базується на умовах стійкості. Розроблено алгоритм реалізації інгібіторної нейромережі в застосуванні до задачі оцінювання сигналу, що характеризує положення левітуючого тіла в просторі. Алгоритм КІНМ може бути реалізований у послідовній або паралельній формі. Моделювання КІНМ за допомогою запропонованого алгоритму вимагає приблизно на три порядки менше часу, ніж безпосереднє інтегрування рівнянь. Розв'язок задачі оцінювання впливу збурень на левітуюче тіло має важливе значення для успішного виконання фізичних експериментів. Запропонований алгоритм буде використано для виділення корисних компонент вимірювань при дослідженні поведінки левітуючого тіла.

Запропоновано ряд методів обробки сигналу з метою пошуку найбільш інформативних характеристик щодо оцінки корисного сигналу та чисельні алгоритми, призначенні для автоматизації обчислень гравітаційних збурень. Було запропоновано чотири підходи до обробки сигналів:

- 1) підхід на основі використання нормалізованого по методу найменших квадратів адаптивного фільтра та лінійного прогнозу;
- 2) підхід на основі компенсатора з адаптивним цифровим фільтром;
- 3) підхід на основі нестационарного канального оцінювання та фільтра Калмана;
- 4) підхід на основі цифрового фільтра зі скінченою імпульсною характеристикою.

Було запропоновано декілька реалізацій на основі перелічених підходів. Перша реалізація побудована на основі методу найменших квадратів та адаптивного фільтру з лінійним прогнозом. Друга реалізація побудована з використанням відомого підходу на основі адаптивного компенсатора з RLS-фільтром. Третя реалізація базується на нестационарному канальному оцінюванні та фільтрі Калмана. Четверта реалізація базується на формулі Савицького і Голая для фільтрації. Показано, що частковим випадком цифрового фільтра є фільтр Савицького—Голая. Проведено тестування алгоритмів за експериментальними даними. Перша реалізація дозволила визначити параметри, що забезпечують стійкість алгоритмів.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз відомих методів досягнення левітациї в некерованій (пасивній) системі з використанням магнітних сил і продемонстровано новизну левітацийного принципу та переваги його використання для створення високоточних гравіметрів. Для різних моделей магнітів (надпровідні

струмові кільця, довгі циліндри, надпровідні струмові прямоугутники) та різної їхньої кількості числа на вільній масі та корпусі приладу отримано достатні умови стійкості МПЯ-левітациї у вигляді обмежень на геометричні та магнітні параметри системи підвісу вільної чутливої маси. Ці результати стали основою для проектування робочої моделі надпровідного гравіметра. Були вивчені динамічні режими вільної маси та взаємозв'язки коливань по відношенню до різних координат вільної маси, які впливають на проблему реєстрації зміщень вільної маси при проведенні гравітаційних вимірювань. Проведені дослідження виключають можливість використання відомих левітаційних ефектів викотемпературної надпровідності для отримання високоточных гравіметричних вимірювань в силу надто великого тертя та низького рівня сил левітациї, генерованих високотемпературними надпровідними магнітами. Розроблені конструкції робочого макету надпровідного гравіметра, що застосовують оптичний метод реєстрації положення вільної маси гравіметра. Досліджені варіанти обладнання, необхідного для проведення пробних левітаційних експериментів.

2. Розроблено функціональну схему оптичного датчика на основі діодного лазера з зовнішнім резонатором як джерелом монохроматичного випромінювання та одномодового оптоволокна як каналу транспортування світла до пробного тіла зі збереженням когерентності оптичного випромінювання. Цей метод дозволяє забезпечити необхідну точність вимірювання положення пробного тіла не гірше від 10 нм, що за попередніми оцінками є достатнім для досягнення необхідної чутливості датчика. Аналіз існуючих методів лазерної інтерферометрії показав, що найбільш перспективним для створення оптичного сенсора є оптичний інтерферометр зі зворотним зв'язком, у якому гетеродинний сигнал створюється за допомогою оптичного зворотного зв'язку при відбивання лазерного пучка від об'єкта та спрямування його назад до лазера. Запропонована функціональна схема оптичного сенсора базується на новому підході, який полягає у комбінації ідеї зворотного зв'язку та інтерференції світла, відбитого пробним тілом та краєм оптичного волокна. У цьому випадку, незважаючи на малу довжину когерентності випромінювання лазерного діода, його потужність залежить від зміщення пробного тіла, і цю залежність можна використати для вимірювання координат пробного тіла. Завдяки своїй простоті новий метод є багатообіцяючим не лише для реалізації мети проекту, а й для використання у багатьох інших галузях.

3. Запропоновано функціональну структуру пакету прикладних програм для обробки сигналів. Вона складається з адаптивного компенсатора, калманівського та цифрових фільтрів, оцінювачів на основі оберненої динамічної моделі та показників Ляпунова, системи, що моделює одновимірний рух пробного тіла та бази даних. Для системи «інструмент—чутливий елемент» були розроблені формат даних та протокол обміну даними. Розроблено програмне забезпечення, що включає оцінювання гравітаційного впливу, бібліотеку сигналів та базу даних про інформацію, необхідну для вимірювань, а також географічні координати місця вимірювань сигналу.

Робота підтримана Науково-технологічним центром України в рамках проекту V039k.

1. Goodkind J. M. The superconducting gravimeter // Rev. Sci. Instrum.—1999.—70, N 11.—P. 4131—4152.
2. Goodkind J. M., Warburton R. J. The superconducting gravimeter // IEEE Trans. Magn. MAG.—1975.—11, N 2.—P. 2142—2151.
3. Kozorez O., Kozoriz V. The new linear motor phenomenon and its characteristics // Intern. Conf. “Linear Drives for Industry Applications LDIA 2003”, Birmingham, UK, 8-10 September, 2003. — P. 212—216.
4. Kozorez O., Kozoriz V., Kryvtsov V., et al. New Maglev Concept and Its Acceptability to Swissmetro // 17th Intern. Conference on Maglev and Linear Drives, Lausanne, Switzerland, 3-6 September, 2002.—P. 123—129.
5. Yatsenko V. Functional structure of the cryogenic optical sensor and mathematical modeling of signal // SPIE conf. “Optical Science and Technologies”, 3-8 August 2003, San Diego, USA: Proc. of SPIE.—2003.—5172.—P. 121—132.
6. Yatsenko V., Principe J. Cryogenic sensor for space operation. // SPIE conf. “AeroSense. Technologies and Systems for Defence & Security”, 21—25 April 2003, Orlando USA: Proc. of SPIE.—2003.—5071.—P. 135—146.

DEVELOPMENT OF THE CRYOGENIC-OPTICAL SENSOR FOR HIGHLY SENSITIVE GRAVITATION MEASUREMENTS

V. O. Yatsenko, T. F. Bekmuratov, P. I. Bidiuk, V. Boiko, S. D. Zhyvyllo, Kh. M. Ismaili, V. V. Kozoriz, O. V. Kozoriz, V. M. Kuntsevych, O. M. Nabiiiev, A. M. Negriiko, N. Plishko, O. K. Cheremnykh, L. P. Yatsenko

A new conception of the cryogenic-optical sensor based on a competitive adaptive sensitive element is given. The sensor element is based on a new magnetic levitation phenomenon, high-precision optical registration of mechanical coordinates of a levitating body, and the robust signal processing tool. We consider the problem of equilibrating gravity forces acting on a free body by magnetic forces so that the six degrees of freedom of a free body are stable. The registration of free body mechanical coordinates is based on the optical system. The main application result of the investigation consists in justification of functional structure.

УДК 550.388

С. В. Панасенко, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тирнов, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Результаты исследований динамических процессов в нижней ионосфере

Розглянуті основні статистичні характеристики огинаючих завади й суміші завади та частково відбитих сигналів, виміряні середньочастотним радаром часткових відбиттів. Описана методика приведені результати дослідження динаміки мезосфери та нижньої термосфери (70—120 км) методом рознесенного прийому з малою (110—160 м) базою. Отримані результати адекватно описують фізичні процеси в нижній іоносфері, а також узгоджуються з результатами інших вимірювань.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из проблем, имеющих глобальное значение, является изучение, моделирование и прогнозирование космической погоды. Поскольку околосземное космическое пространство представляет собой единую сложную открытую физическую систему [4], для успешного решения поставленной задачи требуется большой массив данных, собранных наземными и базирующимиися на космических аппаратах измерительными установками с применением ряда известных методов исследования.

Изучение динамики и электродинамики верхней атмосферы занимает центральное место в международных радиофизических, геофизических и космических программах. Планетарные и акустико-гравитационные волны, источники которых находятся в тропосфере, а также мигрирующие и немигрирующие солнечные приливы эффективно переносят энергию на термосферные высоты, существенным образом влияя на концентрацию нейтральных и ионизированных частиц, их температуру, состав и т. д. Условия распространения этих типов волн зависят от величины, направления и высотного градиента преобладающего ветра, причем зависимость сильнее всего проявляется на высотах мезосферы и нижней термосферы.

Эффективными методами исследования этой области атмосферы являются радиофизические мето-

ды (вертикального зондирования, частичных и метеорных отражений, некогерентного рассеяния и др.). Это обстоятельство связано с отсутствием летательных аппаратов для данных высот (они находятся в стадии разработки), нерегулярностью запуска и кратковременностью полета геофизических ракет.

В работе изложены методика и результаты исследования статистических характеристик радиосигналов и помех, а также параметров дрейфа неоднородностей электронной концентрации D-области ионосферы, отражающих динамику нейтрального компонента. Измерения выполнены на радаре частичных отражений (ЧО), расположенному в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

СВЕДЕНИЯ О РАДАРЕ ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Измерительная установка является единственным в Украине радаром ЧО, позволяющим измерять величину и направление скорости ветра методом разнесенного приема с малой базой [1, 3]. Координаты радара — 49.5° N, 36.4° E. Его рабочая частота $f_0 = 2.2\ldots2.3$ МГц; частота повторения импульсов $F_p = 1\ldots100$ Гц; ширина полосы пропускания радиоприемного устройства $\Delta f = 60$ кГц; импульсная мощность радиопередающего устройства $P = 100$ кВт; коэффициент усиления антенны $G \approx$

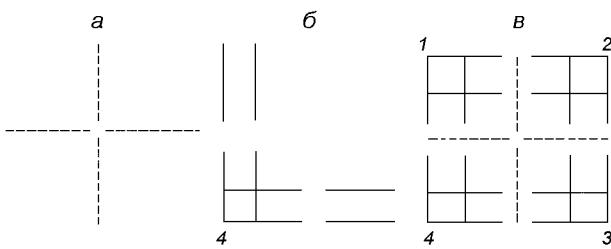


Рис. 1. Схематическое изображение передающей (а) и приемной (б) антенн и общий вид антенного поля (в). Сплошными и пунктирующими линиями показаны соответственно приемные и передающие вертикальные двойные ромбические антенны Айзенберга

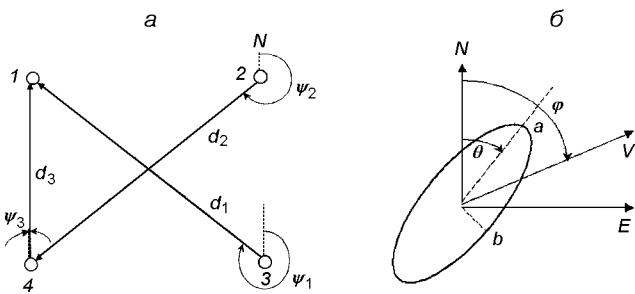


Рис. 2. Расположение приемных антенн (стрелки показывают знак t_{\max}) (а) и основные параметры неоднородностей (б). Здесь d_i и ψ_i ($i = 1, 2, 3$) — расстояния между антеннами и углы между направлениями на север и отрезками, соединяющими антennы, соответственно; a и b — оси характеристического эллипса, θ — угол между большой полуосью эллипса и направлением на север, V — истинная скорость дрейфа, φ — угол между направлением скорости дрейфа и направлением на север; N и E — север и восток соответственно

≈ 100 ; разрешение по высоте $\Delta h = 3$ км; диапазон исследуемых высот $h = 60 \dots 123$ км. Передающая антenna представляет собой систему из четырех вертикальных двойных ромбических антенн и имеет крестообразную форму (рис. 1, а). Каждая из четырех приемных антенн также состоит из антенн Айзенберга и имеет уголковую форму (рис. 1, б). Общий вид антенного поля представлен на рис. 1, в. Фазовые центры приемных антенн расположены на углах квадрата, сторона которого составляет 112 м, а диагональ — 158 м (рис. 2, а). В наблюдениях частота опроса, или дискретизации уровня сигнала, на выходе каждой из антенн составляла $F_d = 6.25$ Гц. Цифровые значения огибающих помехи и ЧО сигнала сохранялись на магнитном носителе.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХ И ЧАСТИЧНО-ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Необходимость исследования помех в ходе эксперимента связана с сильной зависимостью их параметров от географического положения измерительного пункта и геофизической обстановки. Статистические характеристики радиопомех используются при оценке погрешностей определения параметров дрейфа неоднородностей электронной концентрации. Величина погрешностей позволяет судить о достоверности полученных результатов и их адекватности состоянию космической погоды. Знание статистических характеристик ЧО сигналов необходимо для выбора адекватной модели описания исследуемых ионосферных процессов. В качестве основных статистических характеристик использовались распределения огибающих помехи и сигнала, а также авто- и кросс-корреляционные функции интенсивностей помех и огибающих сигналов. Анализ показал, что огибающая помехи $A_n(t)$, как правило, распределена по закону Пуассона (рис. 3, а, б), который имеет вид

$$w(A_n, \mu) = A_n \int_0^{\infty} \lambda J_0(\lambda A_n) J_0(\lambda A_{n0}) f(\lambda) d\lambda,$$

$$f(\lambda) = 2^\mu \left(1 + \sqrt{1 + 2\sigma_n^2 \lambda^2 \mu^{-1}} \right)^{-\mu},$$

где J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $f(\lambda)$ — характеристическая функция; σ_n^2 — дисперсия процесса $A_n(t)$, μ — параметр распределения. Это обусловлено приемом помеховых сигналов от небольшого числа радиостанций, работающих, как правило, в импульсных режимах. Автокорреляционные функции интенсивности помехи имели резкий спад уже при единичном временном сдвиге $\Delta t = 0.16$ с, что указывает на широкополосность помехи. Не обнаруживались четко выраженные пространственная и межполяризационная корреляции помеховых сигналов, что, скорее всего, связано с их приемом с различных направлений боковыми лепестками диаграмм направленности.

Огибающая смеси ЧО сигнала и помехи в одни временные интервалы лучше аппроксимировалась распределением Рэлея—Райса (рис. 3, в), а в другие — распределением Пуассона (рис. 3, г). Последнее переходит в распределение Рэлея — Райса при $\mu \rightarrow \infty$ (на практике при $\mu > 30$). Продолжительность интервалов, которым соответствовало одно или другое распределение, зависела от высоты ЧО, сезона и времени суток. Это говорит о том, что в пределах рассеивающего объема, по-видимому, содержится сравнительно небольшое (около 10—

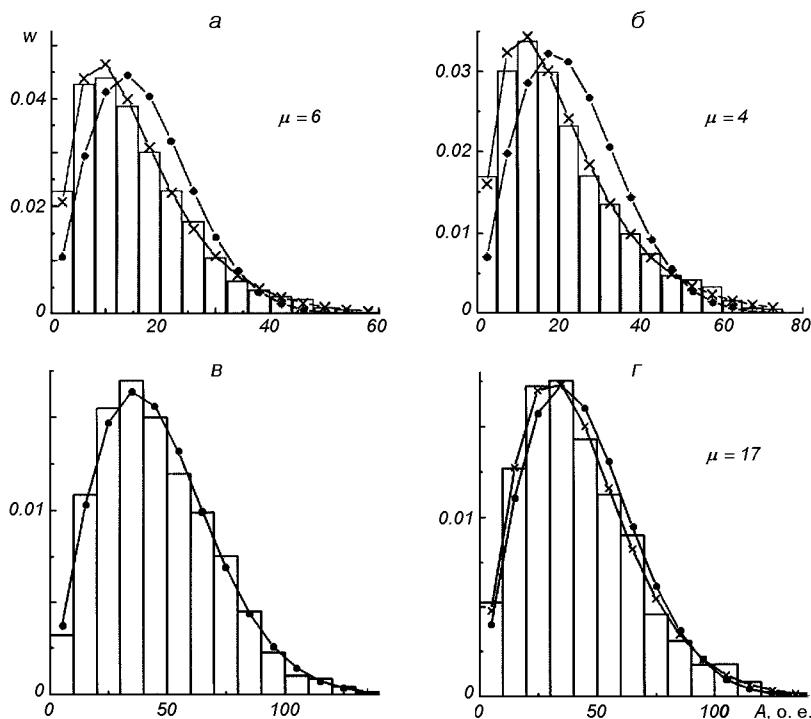


Рис. 3. Примеры гистограмм огибающих помехи для 05.10.02 г., $K_p = 5$ (а) и 08.10.02 г., $K_p = 3$ (б), а также смеси ЧО сигнала и помехи для 01.10.02 г., $K_p = 7$ (в, г) совместно с аппроксимирующими функциями плотности вероятности Пуассона (крестики) и Рэлея (точки). Высота 84 км, отношение сигнал/помеха $q \approx 10$

100), непрерывно изменяющееся число неоднородностей электронной концентрации, размеры которых сравнимы с длиной радиоволны $\lambda_0 = c/f_0$. Однако значения огибающих смеси сигнала и помехи могут быть искажены из-за нелинейности динамической характеристики радиоприемного устройства. Для исключения возможного влияния этой характеристики требуется проведение специальных измерений.

Пространственные кросс-корреляционные функции имели четко выраженные максимумы, коэффициент корреляции огибающих обычновенной и необыкновенной составляющих изменялся в пределах 0.5—0.9. Интервал автокорреляции огибающих составлял 1—3 с.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В основе методики определения величины и направления скорости ветра лежит модифицированный метод полного корреляционного анализа, разработанный в Саскачеванском университете (г. Саскатун, Канада) [6]. Ионосферные неоднородности D-области, образующиеся за счет турбулентности, моделируются облаками с отличной от фоновой электронной концентрацией и эллиптическим гори-

зонтальным сечением (см. рис. 2, б). Их непрерывное возникновение и исчезновение, хаотические и направленные движения приводят к образованию у поверхности Земли сложной дифракционной картины поля. По изменениям этой картины во времени и пространстве судят о динамических процессах в рассматриваемом ионосферном слое.

В общем случае корреляция амплитуд, измеренных на выходе двух антенн, при наличии перемещающейся дифракционной картины является функцией расстояний между антennами и временного сдвига. Методика основывается на аппроксимации авто- и кросс-корреляционных функций, вычисленных из экспериментальных данных, выражениями вида:

$$\rho(d_i, \psi_i, t) = \\ = \exp \left[-0.5 \left(\frac{(d_i \cos(\psi_i - \theta) - Vt \cos(\varphi - \theta))^2}{a^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(d_i \sin(\psi_i - \theta) - Vt \sin(\varphi - \theta))^2}{b^2} + \frac{t^2}{\tau_c^2} \right) \right],$$

где τ_c — время расплывания дифракционной картины. Для определения всех параметров неоднородностей используются временные сдвиги t_{maxi} , соответствующие максимумам трех кросс-корреляционных функций $\rho_i(t)$; значения этих максимумов

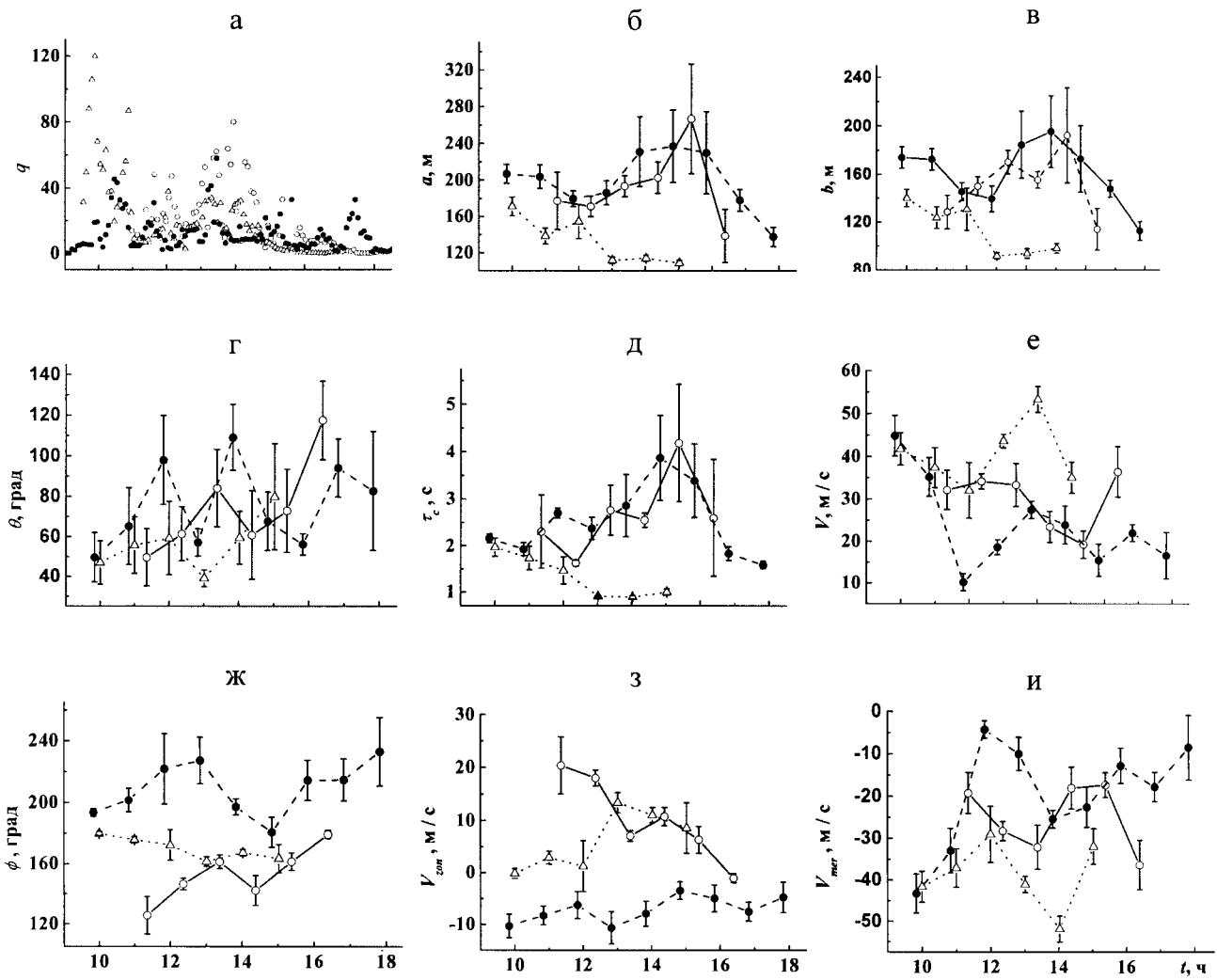


Рис. 4. Примеры временных зависимостей отношений сигнал/помеха (а), а также среднечасовых значений большой (б) и малой (в) полуосей, угла ориентации эллипса (г), характерного времени расплывания дифракционной картины (д), величины (е) и направления (ж) скорости дрейфа неоднородностей, а также ее зональной (з) и меридиональной (и) составляющих (кружки — 01.10.02 г., треугольники — 22.01.03 г., точки — 14.04.03 г.). Время киевское. Положительные значения компонентов скорости указывают на восток и север соответственно

$\rho_{\max i}$; интервал автокорреляции t_a средней для четырех антенн автокорреляционной функции $\rho_m(t)$ при заданном уровне ρ_a .

Система уравнений имеет вид

$$d\rho_i(t_{\max i})/dt = 0,$$

$$\rho_{\max i} = \rho_i(t_{\max i}),$$

$$\rho_a = \rho_m(t_a).$$

Эта система является переопределенной (семь уравнений при шести неизвестных). Для уточнения значений $t_{\max i}$ используется метод наименьших

квадратов с учетом значений $\rho_{\max i}$ (большему значению максимума присваивается больший вес).

В случае получения не имеющих физического смысла результатов (полуоси эллипса и время расплывания — комплексные числа) либо обладающих низкой достоверностью (значение $\rho_{\max i}$ не превышает 0.3; разность между начальным и уточненным значением для хотя бы одного $t_{\max i}$ превышает единичный временной сдвиг Δt и др.), они исключаются из последующей обработки, а параметрам неоднородностей присваиваются нулевые значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Измерения были проведены в октябре 2002 г., а также в январе и апреле — мае 2003 г. в дни с различным уровнем магнитной активности (индекс K_p изменялся от 1 до 7). Непрерывные регистрации огибающих помехи и ЧО сигналов в течение каждого из дней составляли не менее 5 ч. Отношение сигнал/шум по мощности превышало 3 (дневное время, высоты 80—90 км).

На рис. 4 приведены примеры временных зависимостей q , среднечасовых значений параметров неоднородностей и их средних квадратичных отклонений $\sigma = \sigma_x/\sqrt{N}$, где X — исследуемая величина, угловые скобки означают усреднение, N — количество усредняемых значений, для высоты 87 км. Большинство значений полуосей a и b лежали в пределах 100—200 м, что составляет $(0.8—1.5)\lambda_0$. Анизотропия выражена слабо ($a/b \approx 1.1\dots1.3$). 22 января наблюдалось уменьшение размеров неоднородностей в послеполуденные часы. Угол θ в течение дня изменялся от 40 до 140°. В исследуемые дни наблюдались большой относительный разброс его значений в течение часа и отсутствие четко выраженной ориентации большой полуоси. Время расплывания τ_c на протяжении измерений составляло 0.8—4 с. Абсолютная величина скорости лежала в пределах 10—60 м/с. Угол φ изменялся от 120 до 240°. Величина зональной составляющей скорости (восток — запад) варьировалась от -10 до 20 м/с. Меридиональная составляющая истинной скорости дрейфа (север — юг) в большинстве случаев превышала зональную и имела четко выраженное южное направление. Значение меридиональной составляющей изменялось от -5 до -55 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты согласуются с результатами измерений других авторов [2, 5, 7]. Слабая анизотропия облаков с отличной от фоновой электронной концентрацией, а также отсутствие четко выраженной ориентации подтверждает теоретические представления о почти изотропном характере амбиополярной диффузии (на высотах 70—90 км частота соударений ионов с нейтралами существенно больше гирочастоты ионов). Характерные времена расплывания облаков в результате диффузии и рекомбинации порядка 10^2 с, поэтому τ_c , по-видимому, в большей степени связано с хаотическими движениями неоднородностей. Оцененное значение стандартного отклонения хаотической скорости

движения $\sigma_v = \lambda_0/(4\sqrt{2}\pi\tau_c)$ для определенных из эксперимента времен расплывания дифракционной картины составило около 2—9 м/с. Величина и направление скорости дрейфа определяются географией места измерения, временем года и суток, а также зависят от характеристик крупномасштабных волновых процессов. Нами отмечены некоторые суточные и сезонные вариации параметров неоднородностей. Величина скорости дрейфа меньше в дневные часы (12—15 ч), чем в утренние (9—11 ч), замечено некоторое увеличение направленной на юг меридиональной составляющей скорости дрейфа зимой и др. Зависимость параметров дрейфа от уровня магнитной активности, по-видимому, выражена слабо. Однако для адекватной количественной оценки суточных и сезонных зависимостей параметров неоднородностей необходимо проведение продолжительных и систематических измерений, охватывающих все сезоны года, и их анализ совместно с результатами, полученными мировой сетью радаров.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1773.

- Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1988.—№ 318.—С. 21—24.
- Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. — Новосибирск: Наука, 1979.—344 с.
- Концевая Л. Г., Пивень Л. А. Установка для регистрации дрейфов ионосферной плазмы // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1988.—№ 318.—С. 27—28.
- Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8.—С. 59—106.
- Manson A. H., Meek C. E., Hall G., McMurray R. Winds and waves from the Canadian prairies (CNSR) triple-MF radar system // Geophys. Res. Lett.—1993.—20.—P. 1375—1378.
- Meek C. E. An efficient method for analyzing ionospheric drifts data // J. Atmos. Terr. Phys.—1981.—42.—P. 835—839.
- Philipps A., Manson A. H., Meek C. E., Llewellyn E. J. A long term comparison of middle atmosphere winds measured at Saskatoon 52° N 107° W by a medium frequency radar and a Fabry—Perot interferometer // J. Geophys. Res.—1994.—99.—P. 12.923—12.935.

DYNAMICAL PROCESSES IN THE LOWER IONOSPHERE

S. V. Panasenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tugnov,
L. F. Chernogor

We consider the statistics on the envelopes of interference and signal plus interference in the output voltage of the demodulator in the MF radar receiver. The spacedantenna drift radar technique for dynamic studies of the mesosphere and lower thermosphere in a region of 70 to 120 km are described and the results are presented. Our results adequately represent physical processes in the lower ionosphere and are in agreement with other observational data.

УДК 519.23-73

И. В. Архангельская

Інститут астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету), Москва, Росія

Применимость фрактального анализа для обработки временных профилей нестационарных событий, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф в эксперименте на космическом аппарате КОРОНАС-Ф

Розглядаються характеристики часових профілів, зареєстрованих сплесковою чарункою апаратури АВС-Ф, встановленою на космічному апараті КОРОНАС-Ф. Зареєстровані два типи коротких подій порядку кількох мілісекунд. Події першого типу дуже подібні до γ -подій, джерелом яких є атмосфера Землі (TGF). Вважається, що TGF виникають при електричних розрядах між верхнім шаром хмар та іоносферою. Події другого типу пов'язані з післясвіченням детектора. Зроблено спробу розділити такі події з використанням фрактального аналізу. Розглядаються умови, при яких часові ряди можна вважати статистично самоафінними, а також приводяться умови застосування чарункового механізму визначення фрактально розмірності часових профілів, реєстрованих апаратурою АВС-Ф у сплесковій моді, і приводяться результати визначення показника фрактальності цих часових рядів. Всього проаналізовано 100 сплескових часових профілів і виділено три TGF-подібні події, одна з яких спостерігалася у безпосередній близькості від центру тропічного циклону Бені, що підтверджує правильність його інтерпретації як TGF.

Аппаратура АВС-Ф (Амплитудно-Временная спектрометрия Солнца) [1, 2] предназначена для изучения характеристик потоков жесткого рентгеновского и γ -излучения от Солнца, солнечных вспышек и γ -сплесков, а также изучения потоков нейтронов в результате анализа двумерных распределений зависимости полного энерговыделения в детекторе СОНГ-Д от отношения медленного компонента высвечивания к полному компоненту светового выхода. Эксперимент проводится в рамках международной программы КОРОНАС (Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активного Солнца) на спутнике КОРОНАС-Ф, запуск которого был произведен 31.07.2001 г. Прибор АВС-Ф имеет два режима работы: фоновый, в котором проводится анализ потоков излучения и поиск событий типа «вспышка» и при выделении

такого события — всплесковый режим. Аппаратура АВС-Ф переключается во всплесковый режим работы при превышении скорости счета в мягком γ -диапазоне на 6 стандартных отклонений за время 16 мс относительно среднего значения скорости счета за предыдущие 128 бинов по 16 мс [1, 2]. После срабатывания всплесковой ячейки вне зависимости от длительности регистрируемого события временной профиль с дискретностью 1 мс регистрируется в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ (мягкий γ -диапазон) в течение 4.096 с. Во всплесковом режиме аппаратуры АВС-Ф временные профили регистрируются со сцинтилляционного (на основе CsI(Tl)) детектора СОНГ-Д (Солнечные Нейтроны и Гамма-кванты) комплекса СКЛ, разработанного НИИЯФ МГУ, который представляет собой цилиндр \varnothing 200 мм и высотой 100 мм, окружен-

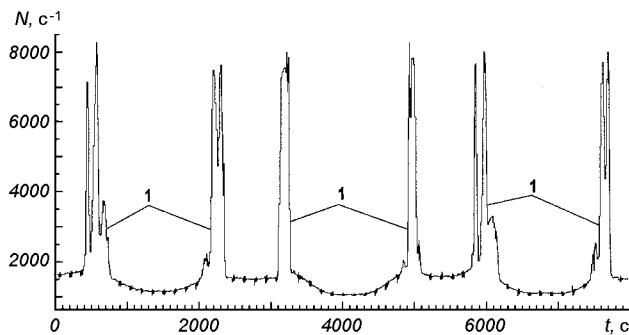


Рис. 1. Типичная зависимость скорости счета от времени для аппаратуры АВС-Ф в мягком γ -диапазоне; 1 — области радиационного пояса

ный для защиты от заряженных частиц антисовпадательным пластиковым детектором.

Среднее значение скорости счета аппаратуры АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ изменяется в несколько раз в зависимости от геомагнитных координат космического аппарата КОРОНАС-Ф по сравнению со средним значением скорости счета в области геомагнитного экватора [6]. Типичный временной профиль в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ по данным аппаратуры АВС-Ф приведен на рис. 1. Тем не менее, в отсутствие всплесковых событий той или иной природы, среднее значение скорости счета аппаратуры АВС-Ф можно считать постоянным на интервале времени длительностью 4.096 с в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ вне областей радиационного пояса и Южно-Атлантической магнитной аномалии (SAA), так как период обращения космического аппарата вокруг Земли — около 90 мин. Естественно, что на всех интервалах по 4.096 с эта величина будет иметь различное значение в зависимости от геомагнитных координат космического аппарата, на котором установлена регистрирующая аппаратура. Таким образом, для определения природы зарегистрированных событий необходимо использовать метод, который позволил бы исследовать изрезанность временного профиля с постоянным средним значением скорости счета вне зависимости от величины этого среднего значения. Следовательно, используемый метод должен обладать свойством масштабной инвариантности по отношению к среднему значению t анализируемой величины, а это является одной из основных особенностей фрактального анализа.

Возможность рассматривать временные ряды, полученные при анализе данных различных физических экспериментов, как множества с определенным показателем фрактальности, определяется их

статистическими свойствами: такие временные ряды должны быть самоподобными или, в крайнем случае, статистически самоаффинными [7], в последнем случае должен быть способ представления рассматриваемого множества K как объединения нескольких непересекающихся подмножеств, каждое из которых получено из некого исходного множества M , имеющим аналогичные K статистические свойства, аффинным преобразованием, которое определяется неким вектором \mathbf{r} . Напомним, что аффинное преобразование переводит точку $x(x_1, \dots, x_n)$ в точку $x'(r_1x_1, \dots, r_nx_n)$, причем коэффициенты подобия r_i могут отличаться друг от друга. Подобные представления часто являются основой конструкции генераторов последовательностей случайных чисел, имеющих гауссово и пуассоново распределение; такие последовательности являются статистически самоаффинными фракталами с $D = 1.5$.

Фоновые загрузки в детекторе прибора АВС складываются как из внутреннего фона, обусловленного активацией кристалла под действием протонов космических лучей, вторичных нейтронов и радиационных поясов, так и внешнего фона, обусловленного диффузным гамма-излучением, локальным гамма-фоном спутника и гамма-альбедо Земли [13]. Их флюктуации с достаточной степенью точности можно считать пуассоновскими при выполнении условия [4]:

$$m \cdot \tau \ll t_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где m — среднее значение скорости счета, τ — мертвое время прибора, информация с которого анализируется, $t_{\text{изм}}$ — время измерения. Мертвое время аппаратуры АВС-Ф составляет приблизительно 100 мкс [3], т. е. условие (1) выполняется в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ на всех участках орбиты, кроме областей радиационного пояса и SAA. Поток частиц высокой энергии, приходящих к наблюдаемому послесвещению детектора в мягком гамма-диапазоне, на различных участках орбиты космического аппарата КОРОНАС-Ф (исключая область радиационного пояса и Южно-Атлантическую магнитную аномалию) также можно считать пуассоновским с переменным средним значением, зависящем от геомагнитных координат космического аппарата. Таким образом, в отсутствие всплесковых событий той или иной природы, флюктуации фона аппаратуры АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ являются пуассоновскими. Однако последовательности случайных чисел, имеющих гауссово и пуассоново распределение со средним значением, сильно изменяющимся в анализируемом диапазоне, статистически самоаф-

финными фракталами отнюдь не являются [7]. Тем не менее, так как в данной работе рассматриваются временные интервалы по 4.096 с, и в пределах каждого такого участка среднее значение скорости счета можно считать постоянным, то фоновый временной профиль на каждом анализируемом отдельном участке в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ является статистически самоаффинным при выполнении условия (1).

С другой стороны, применимость фрактального анализа для обработки временных рядов в физических экспериментах определяется критериями применимости методов определения фрактальной размерности временных профилей. Методы определения показателя фрактальности временного профиля события обычно основаны на разбиении временного профиля на бины и анализа флюктуаций скорости счета в каждом бине. Если количество точек в бине не достаточно для анализа, то используется ячейстый механизм определения показателя фрактальности [8]. При использовании ячейстого механизма для кривой вычисляется размерность Минковского, которая для компактного множества X равна взятому с обратным знаком пределу отношения логарифма минимального количества шаров $N(\varepsilon)$ радиуса ε к логарифму ε , если он существует, т. е.

$$\dim_M(X) = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg \varepsilon}. \quad (2)$$

Изначально при ее вычислении использовались шары в евклидовом пространстве с радиусом $r < \varepsilon \rightarrow 0$, однако есть теорема об эквивалентности размерностей Минковского компактного множества X , если они получены в эквивалентных метриках [7]. Как известно, куб можно представить как шар в ∞ -метрике (p -метрика является обобщением евклидовой метрики, и для R^n определяется следующим образом:

$$\|x - y\|_p =$$

$$= \begin{cases} \sqrt[p]{|x_1 - y_1|^p + \dots + |x_n - y_n|^p}, & 1 \neq p < \infty, \\ \max\{|x_1 - y_1|, \dots, |x_n - y_n|\}, & p = \infty. \end{cases}$$

Итак, размерность Минковского можно вычислять, покрывая исходное множество кубами; в этом случае говорят о клеточной размерности фрактальной кривой. В общем случае следовало бы вычислять для каждого анализируемого временного профиля не размерность Минковского, а размерность Хаусдорфа — Безиковича, которая для множества ξ определяется [8] как число $D \geq 0$, такое что при покрытии этого множества конечным или бесконечным множеством окрестностей радиуса $r_i < \varepsilon$ для любого $a > 0$

$$\inf_{\xi} \sum_{\varepsilon \rightarrow 0} r_i^a \longrightarrow 0 \text{ для каждого } a < D, \\ \inf_{\xi} \sum_{\varepsilon \rightarrow 0} r_i^a \longrightarrow \infty \text{ для каждого } a > D. \quad (3)$$

Однако для самоаффинных фракталов, в качестве которых рассматриваются в данной работе анализируемые временные профили, фрактальная размерность Минковского (клеточная фрактальная размерность) и фрактальная размерность Хаусдорфа — Безиковича совпадают.

В ходе эксперимента были зарегистрированы короткие события двух типов, для выяснения природы которых использовался фрактальный анализ. Длительность событий первого типа несколько миллисекунд, и они очень похожи на γ -события (Terrestrial GAMMA Flashes — TGF), обнаруженные несколько лет назад при обработке данных с аппаратурой BATSE [14], которая была установлена на спутнике CGRO. Источником TGF являлась атмосфера Земли, причем они наблюдались несмотря на то, что события, идущие из-под горизонта Земли, должны были отсеиваться [9]. Предполагают, что TGF связаны с грозовыми явлениями в верхних слоях атмосферы Земли: они возникают при электрических разрядах между верхним слоем облаков и ионосферой. Во время этого процесса наблюдается как минимум четыре вида физических явлений, кроме собственно молний (рис. 2): спрайты (Red Sprite — RS), джеты (Blue Jet — BJ), субмиллисекундные ионосферные вспышки (Elve) и TGF, причем оптическое излучение наблюдалось и камерами, установленными на космических аппаратах [12]. Джеты — пучки синего свечения (иногда с фиолетовым оттенком), возникающие в верхней части заряженной облачной структуры, направленные в нижнюю часть атмосферы и рассеивающиеся на высотах 40—50 км [15]. Спрайты — оптические вспышки красного цвета, наблюдающиеся на высотах 50—90 км непосредственно над грозовым облаком при грозовом разряде [12, 15]. Субмиллисекундные ионосферные вспышки вызваны флуоресценцией азота во время удара молнии, направленного в нижнюю часть ионосферы. TGF возникает при взаимодействии вещества атмосферы и так называемых уходящих (runaway) электронов, т. е. электронов, образовавшихся при ионизации молекул атмосферы Земли космическими лучами и затем ускоренных в процессе многократного рассеяния и при взаимодействии с электромагнитным полем грозовой формации (большая часть электронов, естественно, термализуется в процессе многократного рассеяния, однако плотность электронов с энергией $E_e > 1$ МэВ на высоте около 10 км порядка

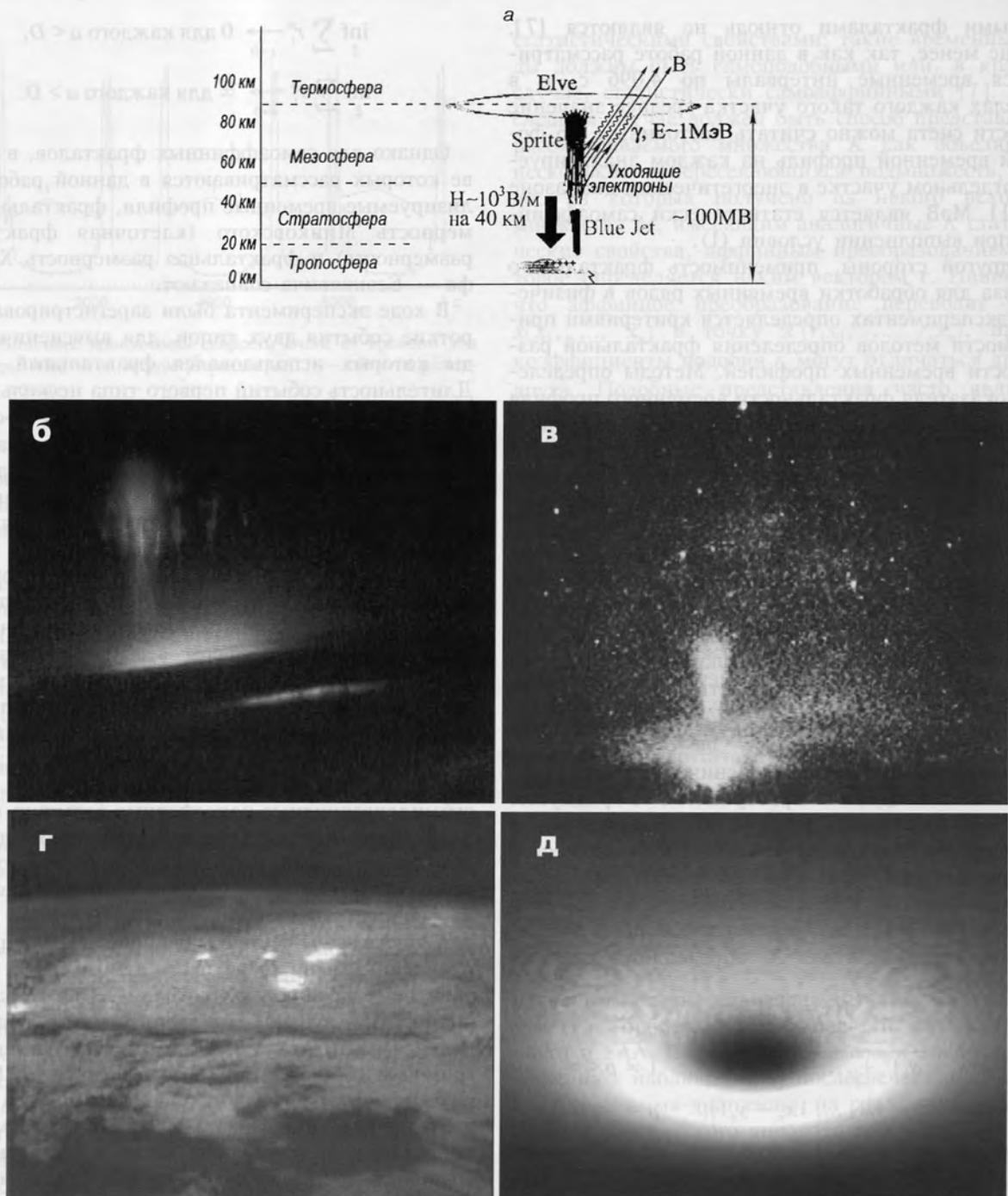


Рис. 2. Физические явления, сопутствующие грозовому разряду в верхних слоях атмосферы Земли [10, 12, 15]: а — схема образования γ -излучения во время грозового разряда; б — фотография RS, наблюдавшегося во время грозы 4 июля 1994 г.; в — фотография BJ, наблюдавшегося во время грозы 1 июля 1998 г. над Флоридой; г — фотография вспышек света во время грозы над Аргентиной ночью 21 октября 1989 г., полученная камерой, установленной на членке; д — фотография субмиллисекундной ионосферной вспышки света во время грозы 1 июля 1998 г. над Флоридой

шее показывает фрактальность отрезков не-

линейных явлений, таких как молнии. В частности, показаны структурные различия между изолированными отдельными вспышками и субмиллисекундными вспышками, а также различия в структуре

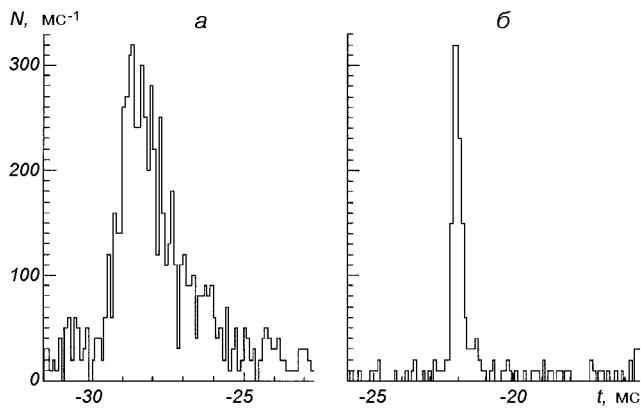


Рис. 3. Типичные временные профили TGF по данным BATSE:
a — BATSE/CGRO (TGF # 2457, $E > 21.39$ кэВ), *б* — BATSE/CGRO (TGF # 2465, $E > 24.77$ кэВ)

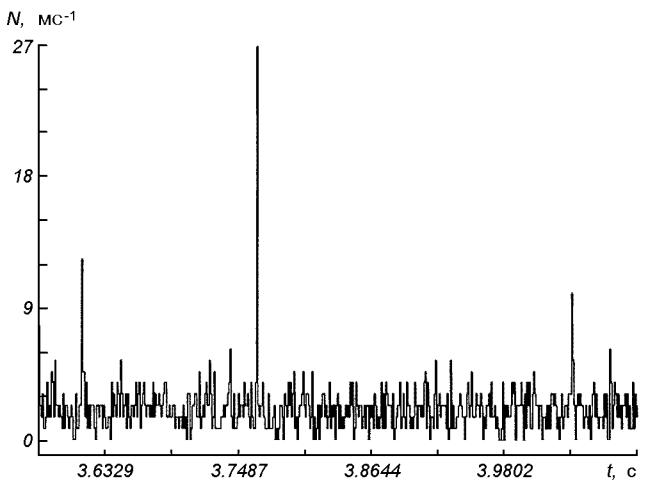


Рис. 4. Типичный временной профиль скорости счета с временной дискретностью 1 мс для аппаратуры ABC-Ф в мягком γ -диапазоне в области геомагнитного экватора

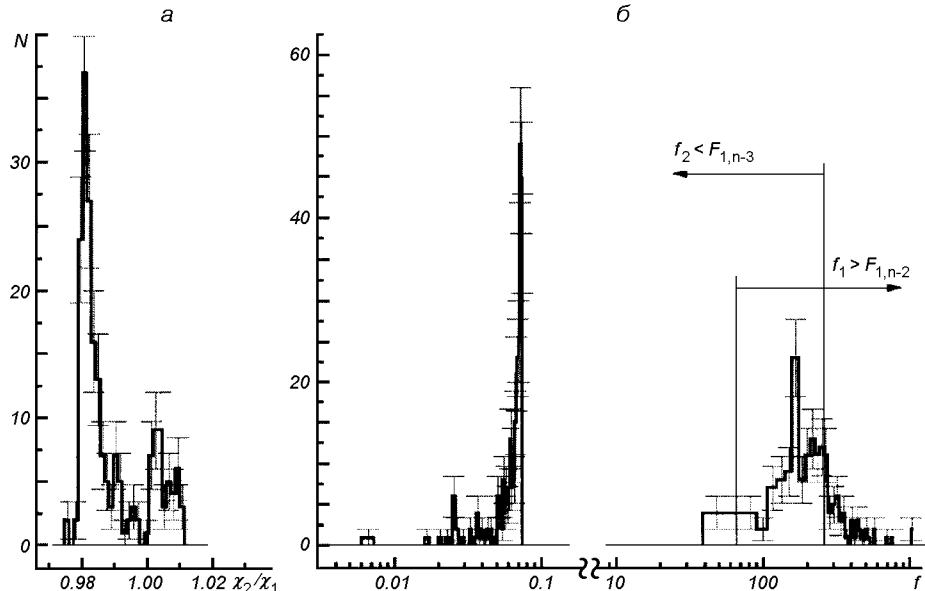


Рис. 5. Распределение анализируемых временных профилей: *a* — по отношению значения статистики χ^2 для аппроксимации параболой к значению статистики χ^2 для аппроксимации прямой; *б* — по f_1 и f_2

10^{-5} см^{-3} [10]). Следовательно, TGF представляет собой тормозное излучение, направленное вдоль пучка электронов, причем средняя энергия γ -квантов $E_\gamma \sim 1 \text{ МэВ}$ [10, 11]. Типичные временные профили TGF по данным аппаратуры BATSE в энергетическом диапазоне 0.02—10 МэВ приведены на рис. 3.

События второго типа регистрируются постоянно в ходе эксперимента (десятки раз в секунду) и связаны с послесвечением детектора при прохождении заряженных частиц высокой энергии через

детектор (антисовпадательная защита блокирует детектор только на время прохождения заряженной частицы, а послесвечение может быть длиннее). Длительность этих событий также составляет несколько миллисекунд (см. рис. 4) и отличить собственно TGF от такого события затруднительно без использования специальных методов.

Для определения клеточной размерности временной профиль покрывается сеткой из ячеек шириной δt_j и подсчитывается суммарный размах скорости счета $N(\delta t_j)$ для набора δt_j . Если зависимость

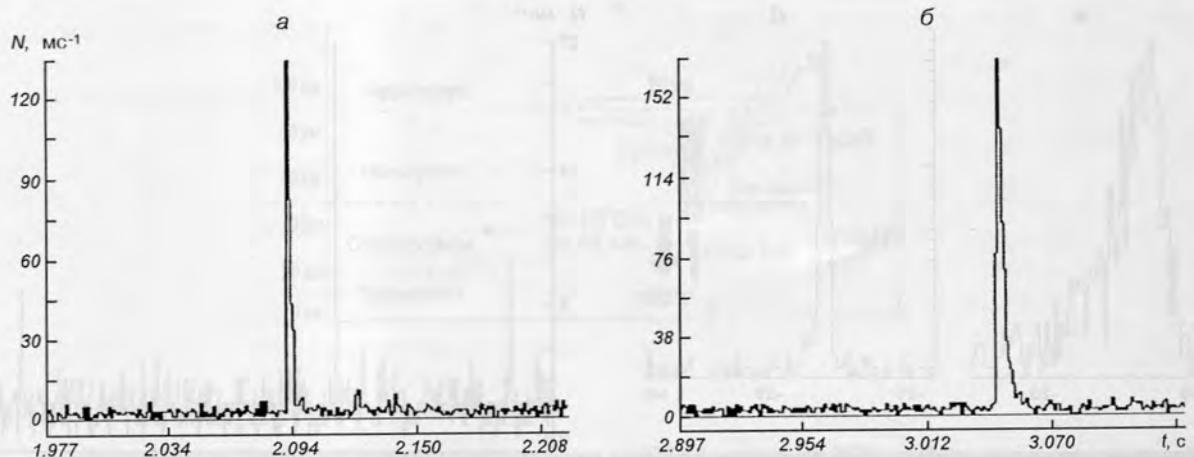


Рис. 6. Типичные временные профили TGF-подобных событий по данным АВС-Ф

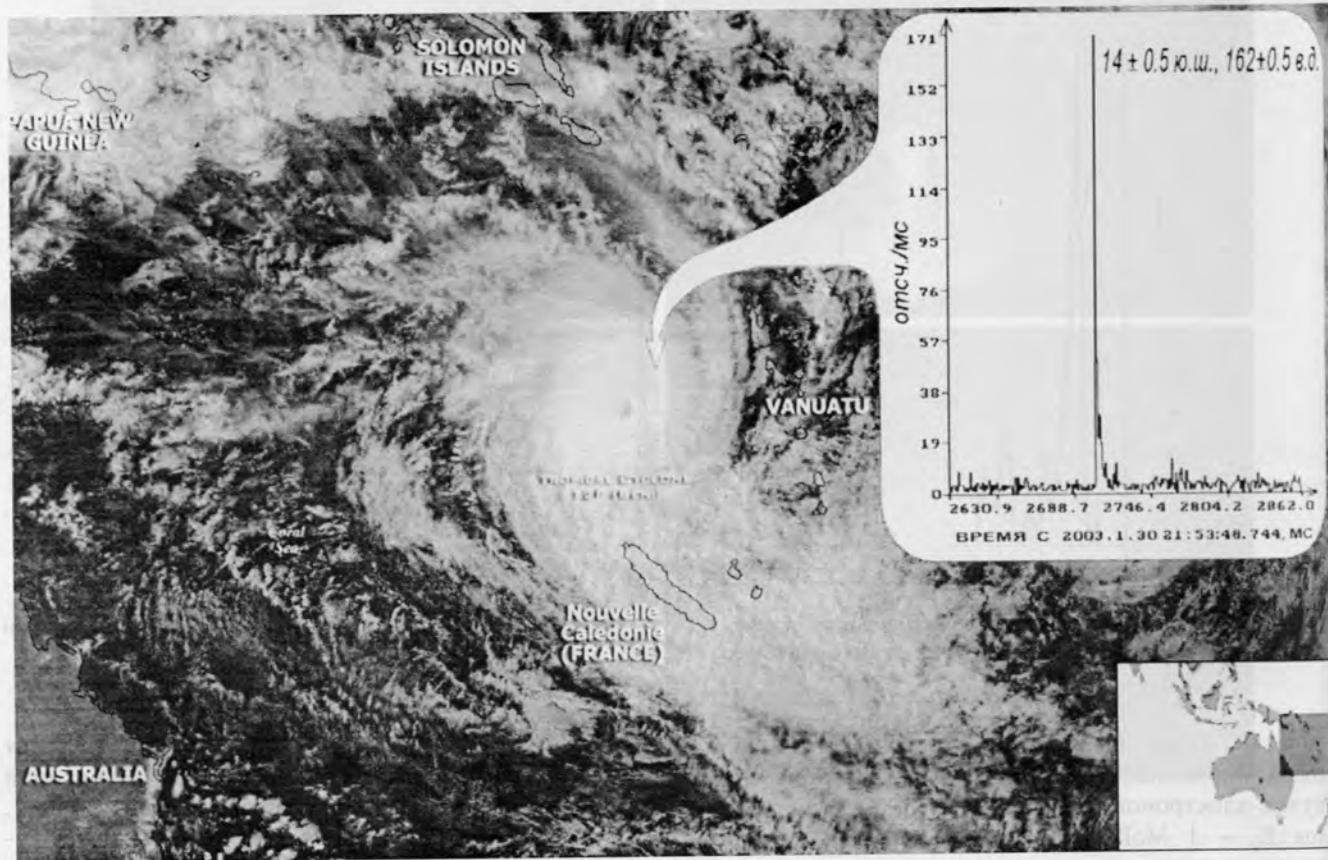


Рис. 7. Вид из космоса облачной формации тропического циклона Бени и временной профиль зарегистрированного в это время TGF-подобного события по данным АВС-Ф

$N(\delta t_j)$ выглядит как

$$N(\delta t_j) = a \times \delta t_j^{-D} \quad (4)$$

для $a > 0$, то показатель фрактальности анализируемой кривой равен D и определяется методом наименьших квадратов (именно погрешностями этого метода обусловлены погрешности показателя фрактальности) по графику функции $\lg N(\lg \delta t_j)$ при условии, что наилучшей аппроксимацией этой зависимости является прямая. Значит, прежде чем использовать ячеистый механизм определения показателя фрактальности, надо сначала доказать, что прямая является наилучшей аппроксимацией зависимости

$$\lg N = -D \lg \delta t \quad (5)$$

для выбранного набора δt_j . В данном случае зависимость (5) такова, что критерий χ^2 не позволяет определить, что является наилучшей аппроксимацией этой зависимости: прямая или полином другой степени (рис. 5), поэтому приходится использовать критерий Фишера. Хорошо известно, что последовательность из n точек может быть аппроксимирована полиномом степени $r = n - 1$. Полином степени r является наилучшей аппроксимацией зависимости (5), если выполняются условия

$$f_r = \frac{\omega_r}{R_r / (n - 1 - r)} > F_{1,n-r-1} \quad (6)$$

и

$$f_{r+1} = \frac{\omega_{r+1}}{R_{r+1} / (n - 1 - (r + 1))} < F_{1,n-(r+1)-1}, \quad (7)$$

где F — функция Фишера, ω_j — набор весов для ортонормированных полиномов Q_{ij} , для которых $N(\delta) = \sum_{j=0}^r \omega_j Q_{ij}$. Таким образом, ячеистый механизм может быть использован для определения значения показателя фрактальности, если для зависимости (5) на каждом анализируемом интервале выполняются условия (6) и (7) при $r = 1$, т. е.

$$f_1 > F_{1,n-2} \quad (8)$$

и

$$f_2 < F_{1,n-3}, \quad (9)$$

где n — количество различных значений δ , а $F_{1,n-2}$ и $F_{1,n-3}$ — соответствующие значения функции Фишера. Распределения 100 анализируемых временных профилей по f_1 и f_2 показаны на рис. 5, б. Видно, что ячеистый механизм применим для определения показателя фрактальности временных профилей с дискретностью 1 мс в энергетическом

диапазоне 0.1—11 МэВ, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф вне областей радиационного пояса и Южно-Атлантической магнитной аномалии.

Чтобы выделить один или несколько TGF на изучаемом временном интервале, содержащем событие, вызванное послесвечением детектора после прохождения заряженных частиц, необходимо анализировать фрактальную размерность временного профиля на временном масштабе по крайней мере в 10 раз большем, чем характерная длительность TGF. В данной работе приводятся результаты анализа 100 временных профилей длительностью по 4.096 с каждый с временной дискретностью 1 мс в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф вне областей радиационного пояса и Южно-Атлантической магнитной аномалии. Для определения показателя фрактальности изучаемых временных профилей использовались пять значений δt_j начиная от 100 мс с шагом 50 мс. На анализируемом интервале выделялся отрезок длительностью 1 с и вычислялась на нем фрактальная размерность временного профиля. Следующий отрезок брался такой же длительности, но со смещением относительно начала отсчета на 10 мс. Среднее значение показателя фрактальности фона для 97 проанализированных временных интервалов $D = 1.50 \pm 0.03$. В трех случаях были получены значения $D = 1.63 \pm 0.03$, $D = 1.37 \pm 0.03$ и $D = 1.62 \pm 0.03$. Временные профили двух выделенных событий приведены на рис. 6: они похожи на TGF по длительности и форме. Одно из выделенных событий было зарегистрировано во время мощного тропического циклона Бени, что подтверждает правильность его интерпретации как TGF. Положение этого TGF находится недалеко от центра циклона (рис. 7). В настоящее время выясняются погодные условия в момент регистрации двух других событий и обрабатываются остальные данные.

Таким образом, условия статистической самоаффинности фонового потока γ -излучения в диапазоне энергий 0.1—11 МэВ выполняются на различных участках орбиты космического аппарата КОРОНАС-Ф (исключая область радиационного пояса и Южно-Атлантическую магнитную аномалию) при анализе временных профилей с дискретностью 1 мс. Для определения фрактальной размерности временных профилей с дискретностью 1 мс в отсутствии всплесковых событий той или иной природы применим ячеистый механизм определения показателя фрактальности. При обработке временных профилей с дискретностью 1 мс по данным, накопленным во всплесковом режиме аппаратуры АВС-Ф, методом фрактального анализа было выделено три события, подобных TGF, при-

чем одно из них было зарегистрировано во время мощного тропического циклона Бени.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки Российской Федерации по теме «Анализ и интерпретация наблюдательных данных для исследования солнечной активности и ее проявлений в околоземном пространстве и земной атмосфере на фазе спада солнечной активности».

1. Архангельский А. И., Гляненко А. С., Котов Ю. Д. и др. Эксперимент АВС-Ф по регистрации быстропеременных потоков космического и солнечного гамма-излучения в проекте КОРОНАС-Ф // Приборы и техн. эксперимента.—1999.—5.—С. 16—23.
2. Архангельский А. И., Гляненко А. С., Котов Ю. Д. и др. Модернизация эксперимента АВС-Ф в проекте КОРОНАС-Ф // Научная сессия МИФИ-1999: Сб. науч. тр. — М.: МИФИ, 1999.—Т. 4.—С. 30—31.
3. Архангельский А. И., Гляненко А. С., Павлов А. В. Предполетная калибровка прибора АВС-Ф комплекса научной аппаратуры КОРОНАС-Ф // Научная сессия МИФИ-2002: Сб. науч. тр. — М.: МИФИ, 2002.—Т. 7.—С. 18—19.
4. Волков Н. Г., Рубцов П. М. Статистические явления в детекторах ядерных излучений. — М.: МИФИ, 1986.
5. Калашникова В. И., Козодав М. С. Детекторы элементарных частиц. — М.: Наука, 1966.
6. Котов Ю. Д., Архангельская И. В., Архангельский А. И. и др. Предварительные результаты обработки данных с прибора АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ // Изв. РАН. Сер. Физ.—2002.—С. 1666—1671.
7. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах, М: Постмаркет, 2000.
8. Федор Е. Фракталы. — М.: Наука, 1991.
9. Horack J. M., Koshut N. M., Mallozzi R. S., et al. Implications of the BATSE data for a heliocentric origin of gamma-ray bursts // Astrophys. J.—1994.—429.—P. 319—324.
10. Inan U. S. Lighting effects at high altitudes: sprites, elves, and terrestrial gamma ray flashes // C. R. Phys.—2002.—3.—P. 1411—1421.
11. Inan U., Reising S. C., Fishman G. J., et al. On the association of terrestrial gamma ray bursts with lightning and implications for sprites // Geophys. Res. Lett.—1996.—23, N 9.—P. 1017—1023.
12. Koshak W. J., Krider E. P. Analysis of Lightning field changes during active Florida thunderstorms // J. Geophys. Res.—1999.—94.—P. 1165—1186.
13. Kotov Yu. D., Belousova I. V., Glyanenko A. S., et al. Background conditions in the range from 30 keV to 5 MeV in the orbit of CORONAS satellites // J. Moscow Phys. Soc.—1996.—N 6.—P. 415—423.
14. Paciesas W. S., Pendleton G. N., Fishman G., et al. Performance of the large-area detectors for the Burst and Transient Source Experiment (BATSE) on the GAMMA Ray Observatory // SPIE.—1989.—1159.—P. 156—164.
15. Wescott E. M., Sentman D. D., Heavner M. J., et al. Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm // Geophys. Res. Lett.—1996.—23.—P. 2153—2156.

THE APPLICABILITY OF FRACTAL ANALYSIS FOR THE PROCESSING OF TEMPORAL PROFILES OF NON-STATIONARY EVENTS DETECTED BY THE AVS-F APPARATUS DURING AN EXPERIMENT ONBOARD THE CORONAS-F SATELLITE

I. V. Arkhangelskaja

Some characteristics of temporal profiles detected by burst trigger of the AVS-F apparatus onboard the CORONAS-F satellite are discussed. Two classes of short events with a duration of some milliseconds were observed. The first class of short events is very similar to γ -events appearing in the Earth's atmosphere (TGF). The second class of short events is connected with the detector persistence. We made an effort to separate such events by the use of the fractal analysis. We discuss the conditions at which the time series may be considered as statistically self-affine ones. The conditions of applicability of the cell mechanism of definition of fractal dimension of the temporal profiles detected by the AVS-F apparatus in a flare mode are considered and the results of definition of a fractal dimension of these time series are presented. In all, 100 flare temporal profiles are studied and three TGF-similar events are selected. One of the events is observed in the immediate vicinity of the centre of the tropical cyclone Beni, which confirms its interpretation as TGF.

УДК 551.520.32

А. К. Федоренко

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Вариации ионного состава F₂-области ионосферы вблизи утреннего терминатора по данным спутниковых наблюдений

На основі супутниковых спостережень низькоширотної F₂-області іоносфери проаналізовано варіації концентрацій іонів, які обумовлені сходом Сонця. Вплив фотоіонізації на іонний склад здійснюється як за рахунок безпосереднього збільшення концентрації плазми, так і за рахунок зміни швидкостей хімічних реакцій. У фотохімічному наближенні побудовано спрощену модель, яка задовільно описує експериментально спостережувані зміни концентрацій різних сортів іонів у перші години після початку іонізації.

ВВЕДЕНИЕ

При пересечении спутником границы между тенью Земли и освещенной Солнцем областью (терминатора) регистрируются значительные изменения ионосферных параметров, в первую очередь концентраций ионов. Случай, когда спутник вылетает из тени в освещенную область (утро) принципиально отличается от случая, когда спутник входит в тень Земли (вечер). После захода Солнца в течение нескольких часов происходят релаксационные процессы, и сохраняется достаточно высокий уровень ионизации. Утром же изменение параметров ионосферы должно происходить резко при критическом значении зенитного угла Солнца, соответствующем уровню экранирования ионизирующего ультрафиолета.

В данной работе исследуются вариации ионосферных параметров F₂-области при пересечении утреннего терминатора по данным наблюдений на спутнике Atmosphere Explorer-E (AE-E) (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/atmoweb>). В исследуемый период орбита была круговой, высота ее изменялась в пределах 250—425 км, наклонение составляло 19.7°. Такая конфигурация орбиты является практически оптимальной для исследования отклика низкоширотной F₂-области ионосферы на восход Солнца.

В работе проанализированы изменения концентраций основного иона O⁺ и молекулярных ионов NO⁺, O₂⁺ в первые часы после восхода Солнца, а также электронная температура T_e. Возникновение минимума концентрации ионов O⁺ и электронов вскоре после начала ионизации в F₂-области объясняется низкой скоростью фотоионизации в течение первого часа после восхода Солнца из-за экранирования ультрафиолета и быстрым разогревом тепловых электронов фотоэлектронами.

ИОНАЯ ХИМИЯ F₂-ОБЛАСТИ

Основным источником ионов и электронов в атмосфере средних и низких широт является фотоионизация нейтральных составляющих. Первичный ионный состав непрерывно видоизменяется за счет протекания ионно-молекулярных реакций (таблица). Преобладающим ионом на рассматриваемых высотах является O⁺. Реакции (1) и (2) определяют основные фотохимические потери этого иона и основную долю продукции молекулярных ионов NO⁺ и O₂⁺. На высотах F₂-области лишь незначительная часть ионов NO⁺ и не более 10 % O⁺ образуется непосредственно за счет фотоионизации из-за низких концентраций соответствующих нейтралов. Ион N₂⁺, наоборот, образуется только за счет

Основные химические реакции в F₂-области с участием ионов

Номер	Реакция	Коэффициент скорости, см ⁻³ с ⁻¹	
		[2]	[7]
Ионно-молекулярные реакции			
1	$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$	$\alpha_1 = 1.3 \cdot 10^{-12} (300/T_i) \Sigma a_v X_v$ $v=0-10^*$	$\alpha_1 = 1.2 \cdot 10^{-12} (300/T_n)^{0.5} (1.0 - e^{-3394/T_n}) + 8.0 \cdot 10^{-11} e^{-6788/T_n}$
2	$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-11} (300/T_i)^{1/2}$	$\alpha_2 = 1.7 \cdot 10^{-11} (300/T_n)^{0.77} + 8.54 \cdot 10^{-11} e^{-3464/T_n}$
3	$O^+ + NO \rightarrow NO^+ + O$	$\alpha_3 = 2.3 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_3 = 8 \cdot 10^{-13}$
4	$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$	$\alpha_4 = 1.4 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_4 = 1.4 \cdot 10^{-10} (300/T_i)^{0.44}$
5	$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	$\alpha_5 = 1 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_5 = 5.0 \cdot 10^{-11} (300/T_i)^{0.8}$
6	$O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$	$\alpha_6 = 6.3 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_6 = 4.4 \cdot 10^{-10}$
7	$O_2^+ + N \rightarrow NO^+ + O$	$\alpha_7 = 1.8 \cdot 10^{-10}$	$\alpha_7 = 1.2 \cdot 10^{-10}$
Реакции диссоциативной рекомбинации			
8	$O_2^+ + e \rightarrow$ $\rightarrow O(^1D) + O(^3P)$ $\rightarrow O(^1D) + O(^1D)$ $\rightarrow O(^1S) + O(^1D)$	$\beta_1 = 2.2 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{2/3}$	$\beta_1 = 1.95 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.7}, T_e \leq 1200 \text{ K}$ $\beta_1 = 1.61 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.56}, T_e \geq 1200 \text{ K}$ $\beta_{1a} = 0.609 \cdot \alpha_3$ $\beta_{1b} = 0.389 \cdot \alpha_3$ $\beta_{1c} = 0.002 \cdot \alpha_3$
9	$NO^+ + e \rightarrow$ $\rightarrow N(^4S^0) + O$ $\rightarrow N(^2D^0) + O$	$\beta_2 = 4.1 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$	$\beta_2 = 4.2 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.75}$ $\beta_{2a} = 0.24 \cdot \alpha_4$ $\beta_{2b} = 0.76 \cdot \alpha_4$
10	$N_2^+ + e \rightarrow$ $\rightarrow N(^2D^0) + N(^4S^0)$ $\rightarrow N(^2D^0) + N(^2D^0)$	$\beta_3 = 2.9 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$	$\beta_3 = 1.8 \cdot 10^{-7} (300/T_e)^{0.39}$ $\beta_{3a} = 0.88 \cdot \alpha_6$ $\beta_{3b} = 0.12 \cdot \alpha_6$
<hr/>			
v	0	1	2
a_v	1	1.56	33
	174	252	58.6
	140	105	123
	123	123	123

* X_v — относительная заселенность колебательных уровней, a_v — отношение констант скоростей реакций с уровнем v к соответствующим константам для уровня $v = 0$

фотоионизации. Фотохимические потери ионов NO^+ и O_2^+ происходят в быстрых реакциях (8), (9) рекомбинации с электронами, а иона N_2^+ — преимущественно в ионно-молекулярных реакциях (4), (5).

В фотохимическом приближении концентрации ионов определяются скоростями реакций (1)–(10) (таблица), которые зависят в первую очередь от кинетических температур реагирующих частиц. Поскольку земная атмосфера уже выше 100 км является существенно неравновесной средой, кинетические температуры отдельных атмосферных составляющих: электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n на высотах F₂-области могут различаться очень существенно. Скорости реакций α_1 и α_2 в общем случае зависят также от колебательной температуры T_k , которая характеризует распределение моле-

кул по колебательным уровням, и в общем случае не равна T_n .

Значения коэффициентов скоростей реакций в таблице представлены по двум источникам [7] и [2]. Наиболее существенное различие наблюдается в α_1 и β_2 , т. е. относительно скоростей продукции и потерь NO^+ . В этих двух источниках отражено два несколько различных подхода к объяснению равновесных концентраций NO^+ . В работе [2] предполагается более слабая зависимость потерь от электронной температуры $\beta_2 \propto (300/T_e)^{1/3}$, но это компенсируется неявной зависимостью α_1 от T_e за счет учета колебательного возбуждения N_2 . В работе [7] учитывается зависимость α_1 лишь от T_n , зато зависимость скорости рекомбинации от T_e более сильная $\beta_2 \propto (300/T_e)^{0.75}$.

ВОСХОД СОЛНЦА НА ВЫСОТЕ СПУТНИКА

При выходе из тени Земли спутник на высоте h освещается Солнцем раньше, чем оно восходит для наземного наблюдателя с теми же географическими координатами. Поскольку земная атмосфера прозрачна только для видимого излучения, момент восхода Солнца на данной высоте не соответствует началу ионизации. Чтобы определить момент начала ионизации на высоте спутника, рассчитывались зенитные углы Солнца Z_i , при которых на определенную высоту доходит ультрафиолетовое излучение с $\lambda > 280$ нм. Расчеты проводились в пренебрежении рассеянием излучения в нижних слоях атмосферы, допускалось также, что все частицы в атмосфере имеют одинаковое сечение поглощения σ . Зенитный угол Z_i зависит от высоты орбиты и времени года. Из расчетов следует, что для спутника на высоте $h = 260$ км Солнце восходит при $Z_0 = 107^\circ$, а фотоионизация начинается при $Z_i = 100^\circ$. В диапазоне зенитных углов $107^\circ \leq Z \leq 100^\circ$ ультрафиолет будет поглощаться преимущественно в толще атмосферы с освещенной стороны и не создаст ионизацию в окрестности спутника. Рассчитанные в таком приближении углы Z_i соответствуют в экспериментальных данных моменту местного времени, когда наблюдаются резкое возрастание потока фотоэлектронов, температуры электронов и концентраций молекулярных ионов.

ВЛИЯНИЕ ФОТОИОНИЗАЦИИ НА ИОННЫЙ СОСТАВ

Воздействие фотоионизации на ионный состав F₂-области осуществляется по двум основным каналам:

- увеличение концентрации свободных ионов и электронов за счет непосредственной ионизации;
- изменение концентраций ионов вследствие зависимости коэффициентов фотохимических реакций от температуры.

Фотоионизация начинается, когда спутник выходит из тени Земли, и зенитный угол достигает критического значения Z_i . Скорость фотоионизации $q \propto [N] \cdot I$, где $[N]$ — концентрация нейтралов, I — поток ионизирующего излучения. При падении излучения снизу ослабление потока I за счет большой концентрации нейтралов налуче вначале очень значительно, поэтому и скорость ионизации невелика. С уменьшением зенитного угла ослабление потока излучения становится меньше, при этом возрастает и поток фотоэлектронов, достигая максимума, когда атмосфера становится практически прозрачной для ионизирующего

ультрафиолета. Выше уровня эффективного поглощения (для средней активности Солнца около 200 км) $q \propto [N]$ и не зависит от I , т. е. будет определяться только количеством нейтралов.

Главным следствием фотоионизации является возникновение свободных фотоэлектронов и ионов. В результате фотоионизации атмосферных нейтралов на высотах F₂-области образуются электроны, а также преимущественно ионы O⁺ и N₂⁺. Ионы O⁺ и O₂⁺ образуются в основном в ионно-молекулярных реакциях. Так, для O₂⁺ продукция в ионно-молекулярных реакциях днем на высоте 260 км $\alpha_2 \cdot [O^+] \cdot [O_2] \approx 34 \text{ см}^{-3}$, а за счет фотоионизации — на порядок меньше: $j(O_2) \cdot [O_2] \approx 4 \text{ см}^{-3}$. Для иона O⁺ вклад фотоионизации в его продукцию еще меньше.

Другим следствием фотоионизации является быстрый разогрев тепловых электронов горячими фотоэлектронами. Средняя энергия фотоэлектронов, образующихся на высотах F₂-области, составляет около 10—20 эВ. Потери их энергии осуществляются многоступенчато за счет упругих и неупругих столкновений с окружающим частицами. Пока энергия достаточно велика, она расходуется в основном на возбуждение электронных, колебательных, вращательных уровней в неупругих столкновениях с атомами и молекулами. Электроны с энергией 2–3 эВ эффективно теряют свою энергию на возбуждение колебательных уровней молекул, в первую очередь N₂. Нагрев тепловых электронов в кулоновских столкновениях с фотоэлектронами становится эффективным, если энергия последних уменьшается примерно до 2 эВ.

Поскольку средняя энергия, теряемая электроном за одно упругое столкновение: $\Delta\epsilon \approx 2(M_e/M_j)3/2k(T_e - T_j)$, где j — частица, с которой электрон сталкивается, потери тепловой энергии в упругих столкновениях с ионами и нейтралами малы из-за отношения масс. По этой же причине скорость обмена энергией между электронами гораздо больше, чем между электронами и ионами. Время установления максвелловского равновесия внутри электронного компонента $\tau_{ee} \sim (10^{-3}—1)$ с [3], а $\tau_{ee}: \tau_{ei} = 1 : (M_i/M_e)$. Таким образом, фотоэлектроны нагревают преимущественно электронный газ.

В предположении преимущественной локальной термализации, которая преобладает до высот около 250 км (зависит от солнечной активности) [6], наблюдаемый вскоре после начала фотоионизации максимум электронной температуры обусловлен резким возрастанием потока фотоэлектронов. Эффект предсумеречного возрастания T_e , связанный с

перекачкой фотоэлектронов из магнито-сопряженной ионосферы, в нашем случае незначителен по двум причинам:

- 1) рассматриваем высоты преимущественной локальной термализации;
- 2) геометрия силовых линий геомагнитного поля на низких широтах такова, что угол между тенью Земли и силовой линией незначителен.

Таким образом, тепловые электроны реагируют быстро на возрастание потока фотоэлектронов увеличением T_e , в то время как ионы и нейтралы обладают «инерцией» относительно нагрева фотоэлектронами. Вследствие этого увеличение T_i и T_n с восходом Солнца происходит плавно по мере увеличения зенитного угла, не обнаруживая резкого всплеска, как электронная температура.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На примере нескольких витков рассмотрим характер вариаций интересующих нас параметров ионосферы в утренние часы по местному времени.

На рис. 1 одновременно с возрастанием потока фотоэлектронов в диапазоне энергий 2–3 эВ наблюдается резкое увеличение концентраций молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ . При этом основной ион O^+ отличается более плавным увеличением концентрации и тенденцией к уменьшению, когда градиент концентрации молекулярных ионов максимален.

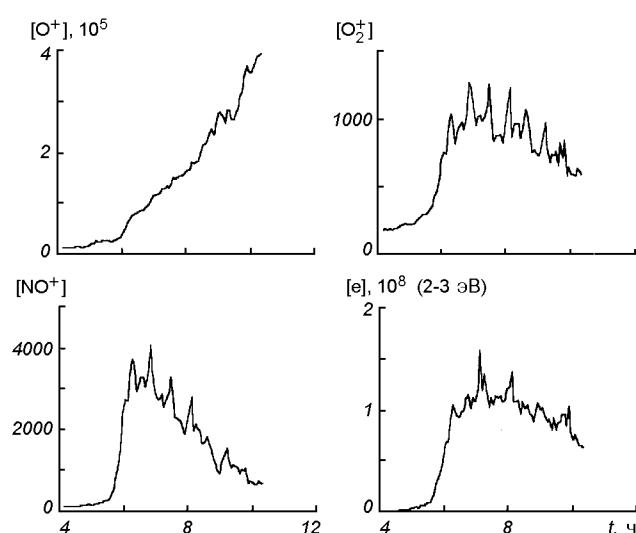


Рис. 1. Вариации концентраций ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ см^{-3} и потока фотоэлектронов, $\text{см}^{-2}\text{s}^{-1}\text{эВ}^{-1}$ в зависимости от местного времени

Виток 9135 (рис. 2) отличается тем, что в утренние часы спутник летел практически вдоль геомагнитного экватора. Наблюданное крупномасштабное возмущение параметров вероятно связано со сверхзвуковым движением терминатора. Отчетливо видна тесная связь между наблюдаемыми параметрами: вариации температуры электронов и концентрации молекулярных ионов происходят в противофазе с $[\text{O}^+]$. На нижнем графике одновременно нанесены в одном масштабе для сравнения концентрации NO^+ и O_2^+ . Видно, что относительные вариации $[\text{NO}^+]$ больше, чем $[\text{O}_2^+]$, особенно с увеличением T_e примерно до 3500–4000 К и выше.

На рис. 3 также наблюдается резкое увеличение концентраций молекулярных ионов с одновременным уменьшением концентрации O^+ , правда падение концентрации O^+ более ощутимое. Отчетливо видно одновременное уменьшение потока фотоэлектронов в диапазонах энергий 2–3 эВ и 7–9 эВ.

Таким образом, из спутниковых наблюдений следует, что начало фотоионизации на высотах F_2 -области обуславливает следующие вариации ионосферных параметров:

- 1) возрастание потока фотоэлектронов, особенно ощутимое для энергий 2–3 эВ;
- 2) увеличение температуры тепловых электронов примерно в два раза;
- 3) появление максимума концентрации молекулярных ионов (концентрация NO^+ увеличивается в 10–30 раз, O_2^+ в 4–6 раз), который достигается примерно через полчаса-час после начала foto-

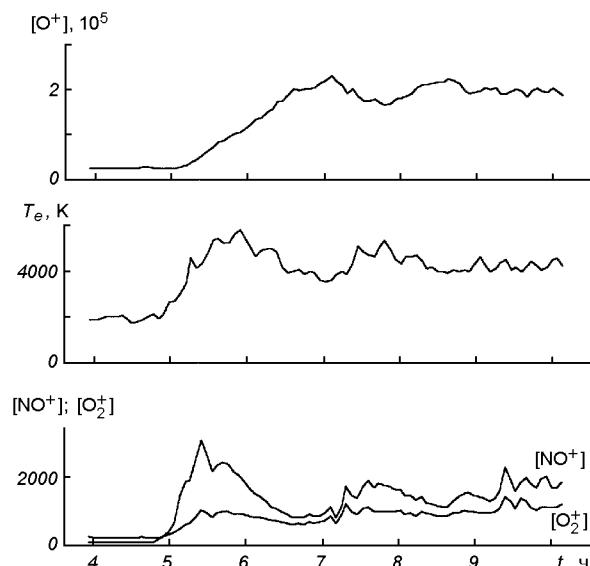


Рис. 2. Концентрации ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ , см^{-3} и температуры электронов, К в зависимости от местного времени

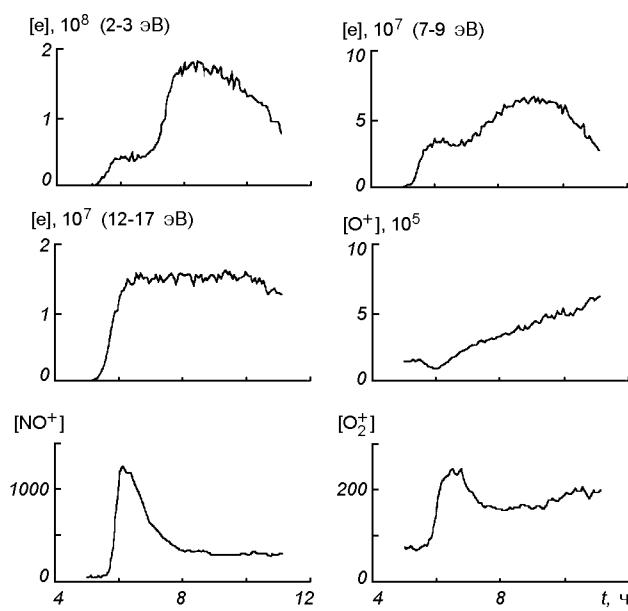


Рис. 3. Потоки фотоэлектронов в трех диапазонах энергий и концентрации ионов, см⁻³ в зависимости от местного времени

ионизации. Этот максимум совпадает во времени и в пространстве с локальным минимумом основного иона O⁺.

СВЯЗЬ С НАЗЕМНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ

Часть из перечисленных эффектов наблюдается также с поверхности Земли.

Утренний минимум ионизации вскоре после восхода Солнца проявляется в данных ионосферного вертикального зондирования [1]. В момент времени, когда на высотах F₂-области начинается фотоионизация, критическая частота f₀ вопреки ожиданию продолжает уменьшаться, достигая минимума, и начинает возрастать лишь спустя некоторое время. Поэтому говорят об эффекте западывания «радиовосхода» по сравнению с восходом видимым. Для объяснения эффекта временного запаздывания F₂ «радиовосхода» привлекаются так называемые терминаторные волны плотности, которые генерируются в нижней атмосфере (тропосфере, озонасфере) и распространяются вверх, испытывая селективное поглощение [1].

Вариации свечения отдельных атмосферных эмиссий можно рассматривать как индикаторы изменения других параметров, недоступных для наземных наблюдений. На увеличение концентрации

молекулярных ионов NO⁺ и O₂⁺ может указывать утреннее сумеречное усиление интенсивности свечения красной кислородной эмиссии O I λ 630.0 нм [4]. Для наземного наблюдателя сумерки соответствуют восходу Солнца в верхней атмосфере. Два основных механизма могут быть ответственны за сумеречное усиление красной линии: 1) диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов NO⁺ и O₂⁺; 2) ударное возбуждение уровня O(¹D) фотоэлектронами с энергией выше 2 эВ.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВАРИАЦИЙ ИОННОГО СОСТАВА

Решалась система уравнений непрерывности для разных сортов ионов в фотохимическом приближении. Для молекулярных ионов это приближение выполнимо за счет малых времен жизни относительно химических реакций. Днем:

$$\tau_{O_2^+} = 1/\beta_2[e] \approx 60 \text{ с},$$

$$\tau_{NO^+} = 1/\beta_2[e] \approx 12 \text{ с},$$

$$\tau_{N_2^+} = 1/\alpha_4[O] \approx 5 \text{ с}.$$

Для преобладающего иона O⁺ фотохимическое время жизни велико: $\tau_{O^+} = 1/\alpha_1[N_2] \approx 5 \cdot 10^3$ с, и фотохимическое приближение на данных высотах в большинстве случаев не выполняется. Однако в приэкваториальной ионосфере в утренний период реализуются условия, когда влияние динамических процессов минимально. Утром (5—7^h LT) и вечером происходит смена знака скорости как вертикального, так и зонального электромагнитного дрейфов, и скорости дрейфовых движений минимальны в течение суток [5]. Усредненные суточные значения скорости и направления ветра и зональный дрейф плазмы обнаруживают тесную корреляцию [5], и скорости ветра также минимальны. Диффузия плазмы осуществляется практически горизонтально вдоль силовых линий, угол между магнитной силовой линией и условной линией терминатора мал. Поэтому можно предположить, что в утренние часы изменение концентрации иона O⁺ происходит лишь в результате химических реакций, а процессами переноса пренебрегаем. Учтем основные химические механизмы образования и потерь для различных сортов ионов в F₂-области (см. таблицу):

- ион O⁺ образуется в результате фотоионизации, погибает в столкновениях с нейтралами. Относительный выход продуктов при ионизации примем согласно [2]: O^{+(2D)} — j =

- $= 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (32 %), $\text{O}^+(\text{P}^2) - j = 6.5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ (68 %), где j — вероятность ионизации атома О выше уровня эффективного поглощения;
- основные источники иона NO^+ — ионно-молекулярные реакции, потери — диссоциативная рекомбинация с электронами;
 - основная продукция O_2^+ осуществляется в ионно-молекулярных реакциях, часть при фотоионизации, потери — в рекомбинации с электронами;
 - N_2^+ образуется за счет фотоионизации с вероятностью $j(\text{N}_2) \approx 2 \cdot 10^{-7}$, потери в ионно-молекулярных реакциях.

Система уравнений непрерывности в фотохимическом приближении имеет вид

$$\begin{aligned} d[\text{O}^+]/dt &= \\ &= j(\text{O}) [\text{O}] - \alpha_1 [\text{O}^+] [\text{N}_2] - \alpha_2 [\text{O}^+] [\text{O}_2] - \alpha_3 [\text{O}^+] [\text{NO}], \\ d[\text{NO}^+]/dt &= \alpha_1 [\text{O}^+] [\text{N}_2] + \alpha_3 [\text{O}^+] [\text{NO}] + \\ &+ \alpha_4 [\text{N}_2^+] [\text{O}] + \alpha_6 [\text{O}_2^+] [\text{NO}] - \beta_2 [\text{NO}^+] [\text{e}], \\ d[\text{O}_2^+]/dt &= j(\text{O}_2) [\text{O}_2] + \alpha_2 [\text{O}^+] [\text{O}_2] - \\ &- \beta_1 [\text{O}_2^+] [\text{e}] - \alpha_7 [\text{O}_2^+] [\text{N}] - \alpha_6 [\text{O}_2^+] [\text{NO}], \\ d[\text{N}_2^+]/dt &= \\ &= j(\text{N}_2) [\text{N}_2] - \alpha_4 [\text{N}_2^+] [\text{O}] - \alpha_5 [\text{N}_2^+] [\text{O}_2] - \\ &- \beta_3 [\text{N}_2^+] [\text{e}] - \alpha_8 [\text{N}_2^+] [\text{NO}]. \end{aligned}$$

В ионосфере должно также выполняться условие квазинейтральности:

$$[\text{e}] \approx [\text{O}^+] + [\text{NO}^+] + [\text{O}^{+2}] + [\text{N}_2^+].$$

В качестве начальных условий выбирались значения концентраций ионов, взятые из наблюдений, концентрации нейтралов из модели MSIS-90. В течение первого часа после восхода Солнца наблюдается значительное ослабление коротковолнового излучения. Чтобы учесть экранирование ультрафиолета, мы предположили, что вероятность ионизации основных нейтралов возрастает линейно от нуля в момент $t = 0$, и через час после «включения» фотоионизации достигают значений $j(\text{O})$, $j(\text{N}_2)$ и $j(\text{O}_2)$, соответствующих вероятностям ионизации выше уровня эффективного поглощения. Характер зависимости T_e от времени задаем, исходя из наблюдений, и аппроксимируем квадратичным полиномом.

В результате интегрирования системы уравнений непрерывности получаем зависимости концентраций ионов от времени после «включения» foto-

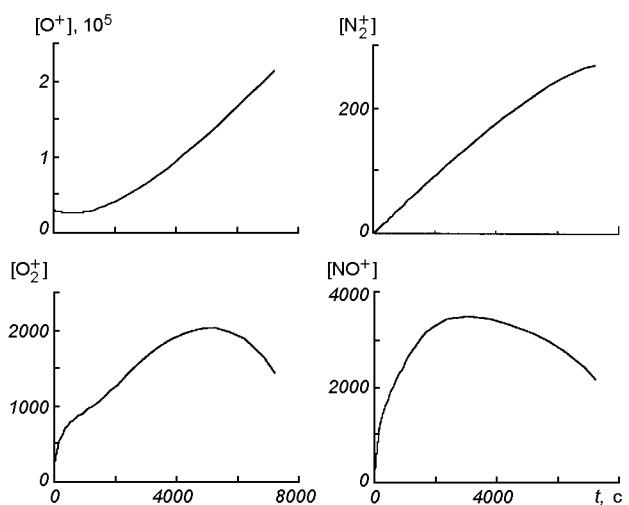


Рис. 4. Зависимость концентраций разных сортов ионов, см^{-3} от времени после включения фотоионизации

ионизации (рис. 4). Как видно, рассчитанные в фотохимическом приближении зависимости концентраций ионов от времени отражают как основные качественные особенности, так и количественно хорошо согласуются с наблюдениями.

Дополнительное химическое уменьшение концентрации O^+ с переработкой в молекулярные ионы по схеме (1) (таблица) возможно при наличии достаточного количества колебательно-возбужденных молекул N_2 . При быстром нагреве тепловых электронов фотоэлектронами создается неустойчивая ситуация. С увеличением температуры электронов отвод тепла от них к ионам уменьшается, так как сечение столкновений электрон-ион $\sigma_{ei} \propto T_e^{-1/2}$. Скорость охлаждения тепловых электронов на ионах:

$$L_{ei} = 7.7 \cdot 10^{-6} \cdot [\text{e}] \cdot [\text{O}^+] \cdot (T_e - T_i) / (16T_e^{3/2}).$$

Поэтому, чем больше нагрет электронный газ, тем менее эффективно происходит его охлаждение на ионах. В то же время с увеличением T_e возрастает скорость охлаждения электронов за счет колебательного возбуждения молекул N_2 .

Таким образом, характер наблюдаемых квазиволновых вариаций на рис. 3 можно объяснить увеличением фотохимических потерь O^+ в пользу молекулярных ионов в областях, где электронный газ разогрет до высоких температур (3000—4000 К и выше), и его охлаждение за счет колебательного возбуждения молекул N_2 начинает преобладать над охлаждением в кулоновских столкновениях с ионами.

ВЫВОДЫ

В результате анализа спутниковых данных выделены следующие особенности поведения F₂-области ионосферы после начала фотоионизации.

1. Характерное время переходного периода от ночного квазиравновесного состояния ионосферы к дневным значениям параметров составляет около 2 ч, пространственные размеры переходной области около 3 тыс. км.

2. По скорости отклика на «включение» фотоионизации отчетливо выделяются две группы ионосферных параметров:

- быстро реагируют (характерное время отклика около 10 мин): T_e и концентрации молекулярных ионов;
- медленно реагируют (характерное время отклика около часа): $[O^+]$, $[e]$, T_n , T_i .

В рамках фотохимического приближения без привлечения дополнительных динамических механизмов удается интерпретировать основные особенности поведения низкоширотной F₂-области ионосферы в утренние часы.

1. Васильев В. П., Шубова Р. С. Особенности поведения критической частоты F₂-области ионосферы в период восхода Солнца. — Харьков, 1990.—18 с.—(Препринт / АН УССР. Радиоастрономический ин-т; № 46).
2. Гордиц Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. Теория

инфракрасного излучения околоземного космического пространства // Тр. ФИАН.—1978.—105.—С. 6—70.

3. Маров М. Я., Колесниченко А. В. Введение в планетную аэрономию. — М: Наука, 1987.—456 с.
4. Фишкова Л. М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. — Тбилиси: Мецниереба, 1983.—271 с.
5. Kelley M. C. The Earth's ionosphere plasma physics and electrodynamics. — Akad. Press. Inc. Inter. Geophys. Series.—1989.—471 p.
6. Schunk R. W., Andrew F. Nagy. Electron temperatures in the F region of the ionosphere: theory and observations // Rev. Geophys. and Space Phys.—1978.—16, N 3.—P. 355—399.
7. Strickland D. J., Bishop J., Evans J. S., et al. Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): theory, software architecture, inputs, and selected results // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.—1999.—62.—P. 689—742.

VARIATIONS OF ION CONCENTRATION OF F2 REGION OF THE IONOSPHERE IN THE VICINITY OF MORNING TERMINATOR FROM DATA OF SATELLITE OBSERVATIONS

A. K. Fedorenko

Variations of ion concentration caused by sunrise are analysed on the basis of satellite observations of low-latitude F2 region of the ionosphere. The photoionization influence on ion composition is caused both by direct increase of plasma density and by the variation of chemical reaction rates. A simplified model is constructed in the photochemical approximation. The model describes adequately detected changes of density of various ion components after the beginning of ionization.

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Земля—атмосфера—геокосмос

как открытая динамическая нелинейная система

Обґрунтовано, що утворення тектоносфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ТАІМ) є складною відкритою динамічною нелінійною системою. Сформульовані основні положення системної парадигми, що ілюструються низкою прикладів. До найважливіших властивостей системи належить появі тригерних механізмів вивільнення енергії. Високоенергетичні явища викликають в системі цілий комплекс процесів, перебудову характеру взаємодії підсистем. Активні експерименти в системі ТАІМ показали обмеженість лінійного опису реакцій підсистем на потужне енерговиділення, дозволили встановити можливість виникнення великомасштабних і глобальних збурень при локальному і локалізованому енерговиділеннях, а також виявити та ідентифікувати типи хвиль, що переносять зазначені збурення. Встановлено, що висипання енергійних частинок з магнітосфери в середніх широтах супроводжує більшість нестационарних процесів у системі ТАІМ.

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ПАРАДИГМЫ

Целью работы является обоснование основных положений системной парадигмы применительно к объекту тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ТАІМ).

Земля и околоземная среда — единая система, состоящая из геосфер. В отличие от ТАІМ геокосмосфера образована верхней атмосферой, ионосферой и магнитосферой. Качественно новое понимание наблюдаемых процессов во всех геосферах и построение их физико-математических моделей невозможно в рамках прежней парадигмы — совокупности исходных положений данной науки.

Новая — системная — парадигма явилась результатом труда многих специалистов. В четком виде она сформулирована в 80-х годах прошлого века автором настоящей работы [2]. Новая парадигма предполагает рассмотрение образования ТАІМ как открытой динамической и нелинейной системы [2—4]. Между подсистемами есть прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. В систему ТАІМ как «сверху», так и «снизу» поступают излучение, вещество, энергия и негэнт-

ропия (рис. 1, 2). Система ТАІМ — динамическая система. Энергетика естественных и антропогенных процессов в системе ТАІМ — значительна, что предопределяет ее нелинейность. Для нелинейных систем характерны сложность процессов, множест-

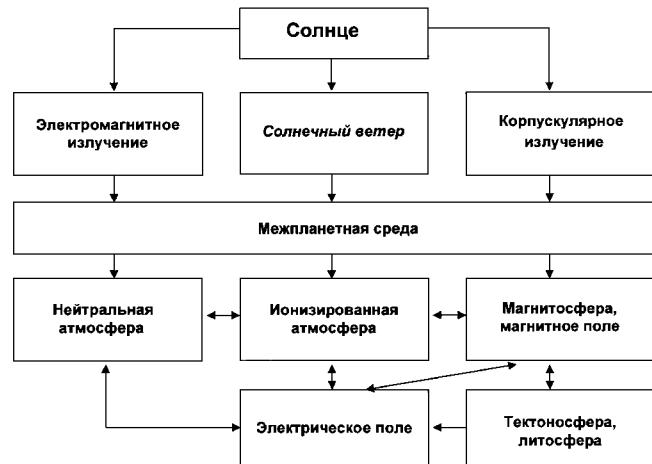


Рис. 1. Схема взаимодействия подсистем

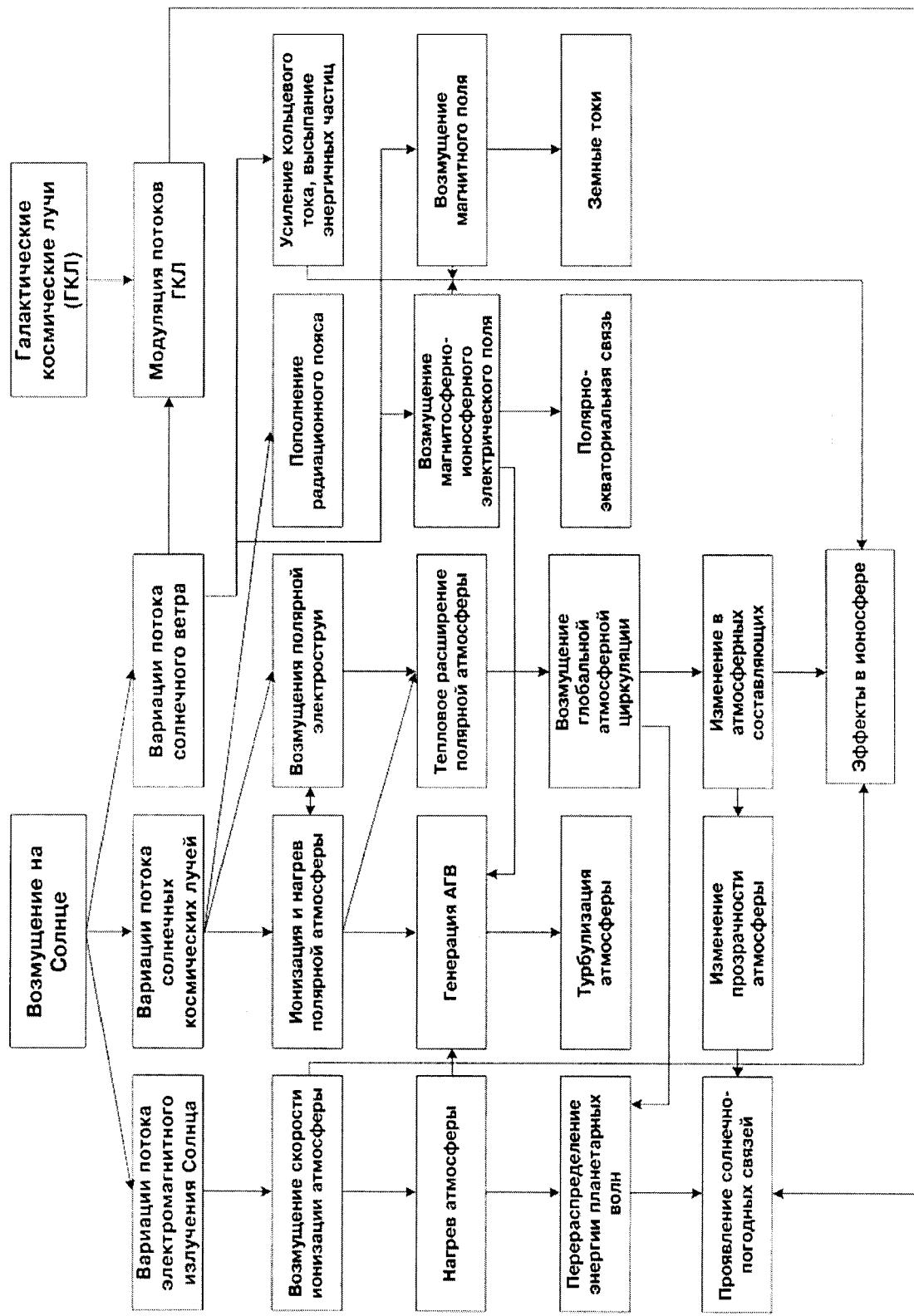


Рис. 2. Схема процессов, сопровождающих геокосмическую бурю и вариацию космической погоды



всего в окрестности границ из профилей моделирования верхней мантии и подошвы в магнитосферой. Использование наблюдаемых превышений над широтами построение их гравито-магнитических моделей позволяет в рамках предлагаемой парадигмы — синтезировать исходные положения этой парадигмы.

Рис. 3. Упорядоченная облачная структура 7 ноября 2001 г. над Украинской антарктической станцией «Академик Вернадский» (Фото участника VI украинской антарктической экспедиции К. П. Гармаша)

венность состояний, возможность возникновения детерминированного хаоса, самоорганизации, проявление триггерных эффектов, возникновение новых свойств у системы и т. п. [4].

Пример явления самоорганизации показан на рис. 3. К явлению самоорганизации также относится возникновение когерентных структур, обнаруженных в амплитуде хаотического, рассеянного неоднородностями D-области ионосферы радиосигнала (рис. 4). Упорядоченность обусловлена, скорее всего, ионосферно-магнитосферным взаимодействием, и в частности, пульсирующими потоками энергичных электронов.

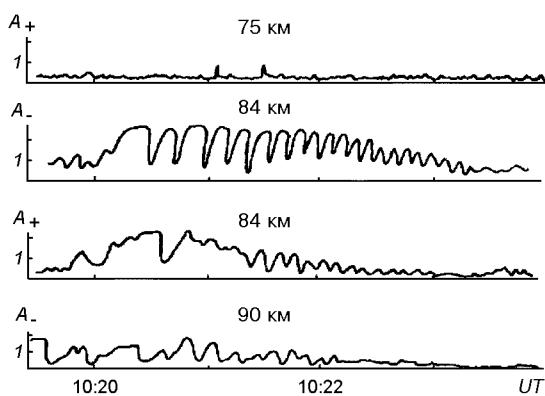


Рис. 4. Временные вариации амплитуд частично отраженных (обратно рассеянных неоднородностями нижней ионосферы) обыкновенной (знак «+») и необыкновенной (знак «-») составляющих сигнала 23 января 1984 г., сопровождавших возмущение ионосферы мощным радиоизлучением. Основные параметры возмущающей радиосистемы (вблизи г. Нижний Новгород): частота $f_1 = 5$ МГц, эффективная мощность $P_1 G_1 \approx 200$ МВт, длительность излучения $\tau_1 = 7$ мин, период цикла $T_1 = 15$ мин. Параметры радара частичных отражений (вблизи г. Харьков): импульсная мощность $P_2 G_2 = 10$ МВт, частота $f_2 = 2.2$ МГц, длительность импульса $\tau_2 = 25$ мкс, период $T_2 = 1$ с. Зондирующую волну линейно поляризованная. Обе системы излучали вертикально вверх. Значения амплитуд приведены в относительных единицах

ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТАИМ

Солнце — основной источник энергии на Земле. Солнечные вспышки и выбросы корональной массы формируют состояние космической погоды (см. рис. 1, 2). В геокосмосфере им сопутствует целый комплекс физических процессов, называемый геокосмической бурей. Энергия и мощность возмущенного солнечного ветра, падающего на магнитосферу Земли, может достигать 10^{17} Дж и 10^{14} Вт.

Солнечная вспышка сопровождается ростом интенсивности оптического, рентгеновского и корпу-

скулярного излучений. При этом электронная концентрация N в D-области ионосферы увеличивается на 1-2 порядка, возникают геомагнитные пульсации в диапазоне периодов 10—1000 с, генерируются волновые возмущения (ВВ) в атмосфере и ионосфере.

Затмение Солнца (ЗС). Это явление также обладает значительной энергетикой и вызывает комплекс физико-химических процессов на всех высотах, а также перестройку всей геокосмосферы в течение 2—4 ч. Усиливается атмосферно-ионосферное, ионосферно-магнитосферное и ионосферно-плазмосферное взаимодействия. Во время частных (73 %) ЗС 11.08.99 г. и 31.05.03 г. имело место значительное (на 10—50 %) уменьшение N при $z = 70\ldots350$ км. Высыпание электронов 11.08.99 г. привело к росту N на высотах 81—87 км через 100—40 мин после начала ЗС. Объяснено малоинерционное уменьшение температуры электронов, достигшее 420—600 К при $z \approx 200\ldots700$ км, и инерционное уменьшение температуры ионов T_i от 100 до 600 К, имевшее место на высотах 400—700 км. Время становления T_i составляло 40—20 мин соответственно. Во время ЗС нисходящий поток плазмы из плазмосферы достиг $-2.5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}$, а до и после ЗС восходящие потоки составляли $(1\ldots2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}$ [1].

Солнечный терминатор (СТ) приводит к перестройке ионосферно-плазмосферного и ионосферно-магнитосферного взаимодействий, вызывает высыпание частиц из радиационного пояса в нижнюю ионосферу, генерирует ВВ в ионосфере и т. д. Относительная амплитуда ВВ $\Delta N/N$ обычно 1—10 %, но может достигать и 20—30 %, продолжительность — около 1-2 ч, типичные периоды $T \approx 15\ldots60$ мин.

Геокосмические бури. Этот термин объединяет магнитную, ионосферную и атмосферную бури, вызванные воздействием на геокосмосферу возмущенного солнечного ветра. Энергетика бури велика (табл. 1). Энергия солнечного ветра из магнитосферы по силовым линиям в виде электрических полей, потоков частиц и плазмы проникает в ионосферу и атмосферу, вызывая их нагрев и подъем. При этом возмущается система термосферных ветров, возникает перестройка химических реакций, генерируются и перемещаются ВВ. Важно, что волны $\Delta N/N$ может достигать 50 %. Такие волны относятся к нелинейным, их профиль N-образный. В волновых пакетах преобладают гармоники с $T \approx 40\ldots120$ мин, их скорость 0.5—0.7 км/с.

Сильные землетрясения (ЗТ). Энергия сильнейшего ЗТ достигает 10^{19} Дж, мощность — 10^{17} Вт.

Таблица 1. Энергетические характеристики геокосмической бури

Область геокосмоса	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Относительное изменение энергии	Примечание
Магнитосфера	10^{16}	10^{12}	10^4	10^{-2}	Энергия магнитного поля
	10^8	10^4	10^4	10^2	Энергия электрического поля
Ионосфера	10^{12}	10^8	10^4	± 1	Тепловая энергия
	10^5	10	10^4	10^2	Энергия электрического поля
Термосфера	10^{15}	$10^{10} - 10^{11}$	$10^4 - 10^5$	10^{-3}	Тепловая энергия

Таблица 2. Энергетические характеристики полей сейсмического происхождения

Поле	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Примечание
Электромагнитное:				
$f \leq 10$ Гц	$10^{10} - 10^{11}$	10^8	$10^2 - 10^3$	Достигает ионосферы и магнитосферы
$f = 10^3 - 10^4$ Гц	$10^{13} - 10^{14}$	10^{11}	$10^2 - 10^3$	Достигает ионосферы и магнитосферы
$f = 10^5 - 10^6$ Гц	$10^{15} - 10^{16}$	10^{13}	$10^2 - 10^3$	Сильно ослабляется в литосфере
Электрическое	10^9	$10^4 - 10^6$	$10^3 - 10^5$	Достигает ионосферы
Магнитное	10^{10}	10^8	10^2	Достигает ионосферы
Инфразвуковое	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{13} - 10^{14}$	10^2	Достигает высот порядка 300 км

Таблица 3. Эффекты метеорных потоков

Источник	Δt , с	Δq , $m^{-3} s^{-1}$	ΔN , m^{-3}	$\Delta N/N$	ΔT_a , К
Фон метеоров	10^5	$10^3 - 10^4$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-1}$
Метеорный поток	10^5	$10^6 - 10^7$	$2 \cdot 10^9 - 2 \cdot 10^{10}$	$1 - 10$	$10 - 100$
Сильнейший метеорный дождь	10^3	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{10} - 4 \cdot 10^{12}$	$20 - 2000$	$10 - 100$

Сейсмические процессы сопровождаются генерацией электромагнитного излучения в диапазоне частот $f \leq 10^6$ Гц, квазистатических электрических и магнитных полей, а также акусто-гравитационных волн (АГВ), т. е. инфразвуковых и внутренних гравитационных волн — ВГВ. За взаимодействие подсистем в системе ТАИМ отвечают механизмы, связанные с генерацией АГВ (акустико-гравитационный механизм), электромагнитного излучения (электродинамический механизм) и квазистатических полей (квазистатический механизм). Их энергетика — значительна (табл. 2). ЗТ вызывают комплекс крупномасштабных и глобальных процессов в системе ТАИМ: генерацию и распространение ВВ, стимулированное высapsulation электронов, усиление уровня шумового радиоизлучения и т. п.

Грозовая активность (ГА). Энергия и мощность сильнейшей молнии достигают 10^{10} Дж и 10^{10} Вт. Мощность P_{em} ОНЧ-излучения молнии составляет 1—10 МВт, плотность потока мощности

в геокосмосферу $10 - 100$ мВт/м². Таких значений достаточно для перестройки ионосферно-магнитосферного взаимодействия, для стимуляции высapsulation заряженных частиц из радиационного пояса. На Земле одновременно происходит около 2000 гроз, площадь каждого очага порядка 1000 км². При этом $P_{em} \sim 1 - 10$ ГВт. Электростатическая энергия и мощность среднего грозового облака порядка 10^{12} Дж и $3 \cdot 10^9$ Вт, а всех грозовых облаков — на 3 порядка больше. Мировая ГА осуществляет «подпитку» геокосмосферы, стимулируя взаимодействие между подсистемами. Локальные эффекты гроз сводятся к нагреву нижней ионосферы, высapsulationу энергичных частиц, свечению атмосферы, генерации АГВ и т. п.

Метеорные потоки (МП) приводят к нагреву атмосферного газа, увеличению средней концентрации электронов N в Е-области ионосферы (в ночные времена), к генерации возмущений магнитного и ионосферного электрического полей и т. п. Эти

эффекты являются усредненными по времени действия метеорного потока. Результаты расчета усредненных возмущений N и температуры атмосферного газа T_a для высоты 120 км, где ночью $N = 2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, приведены в табл. 3 (Δt — продолжительность потока, Δq — изменение скорости ионизации).

АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Мощное радиоизлучение (MP) оказывает только электромагнитное воздействие на плазму и является экологически «чистым». Нами выполнен анализ измерений, проведенных в 1972—2000 гг. (более 3000 ч наблюдений). Для воздействия на геокосмосферу использовались установки, удаленные от места наблюдения (г. Харьков) на расстояния $R \sim 100, 700, 1100, 2000$ и 10000 км. Их эффективная мощность составляла $10\text{--}380$ МВт, $f \approx 1\text{--}8$ МГц (рис. 5, 6).

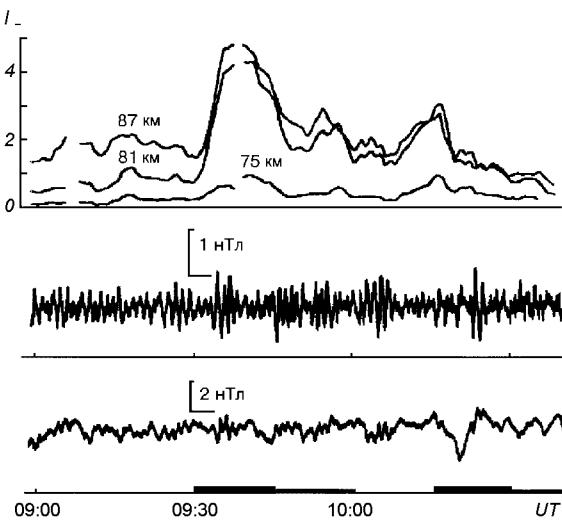


Рис. 5. Временные вариации интенсивности частично-отраженных (обратно-рассеянных неоднородностями нижней ионосфера) радиосигналов (необыкновенная компонента) и компоненты «север — юг» индукции геомагнитного поля в диапазоне частот $0.01\text{--}0.3$ и $1.4\text{--}13$ мГц, сопутствовавшие включению мощного радиоизлучения. Возмущающая радиосистема расположена вблизи г. Москва, а зондирующую — вблизи г. Харьков (расстояние около 700 км). Измерения флюктуаций геомагнитного поля проведены в обсерватории Борок (Ярославская обл.). Значения интенсивности приведены в относительных единицах. На оси времени показан режим излучения возмущающей установки (15 мин эффективная мощность $P_1G_1 = 80$ МВт, 15 мин $P_1G_1 = 40$ МВт, далее пауза 15 мин); частота $f_1 = 5.905$ МГц, амплитудная модуляция колебанием с частотой 1 кГц, глубина модуляции 60 %. Параметры радара частичных отражений такие же, как на рис. 4. Измерения проведены 20 ноября 1986 г.

В результате многолетних комплексных радиофизических наблюдений экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения интенсивных ($\sim 100\text{--}1000\%$) крупномасштабных и слабых ($\sim 1\text{--}10\%$) глобальных аperiодических возмущений N в нижней ионосфере, а также ВВ в средней ионосфере, сопровождаемых вариациями геомагнитного поля, стимулированных воздействием на ионосферу мощного нестационарного радиоизлучения декаметрового и гектометрового диапазонов. Процессы в нижней ионосфере связаны с перестройкой взаимодействий в геокосмосфере и высыпанием частиц из радиационного пояса, в средней ионосфере — с генерацией и распространением волн плотности, период, продолжительность ΔT и скорость v которых составляли соответственно 10—30 мин, 1—2 ч и 0.5—0.7 км/с. При этом $\Delta N/N \sim 1\text{..}10\%$ (см. рис. 5, 6).

Космические аппараты (КА) с включенными двигателями оказывают на среду гидродинамическое, тепловое, электромагнитное и химическое воздействия. В результате возникают геокосмофизические, радиофизические, оптические и другие эффекты. Анализ измерений выполнен для более чем 300 стартов КА (более 20 типов ракет мощностью $10^7\text{--}10^{11}$ Вт) с 12 космодромов, 55 посадок КА и падений 3 орбитальных станций. Имели место и аварийные запуски КА. Установлено, что старты КА могут вызывать крупномасштабные и глобальные возмущения в геокосмосфере, перестраивать взаимодействия между ее подсистемами. Определены основные типы волн, переносящие возмущения [4].

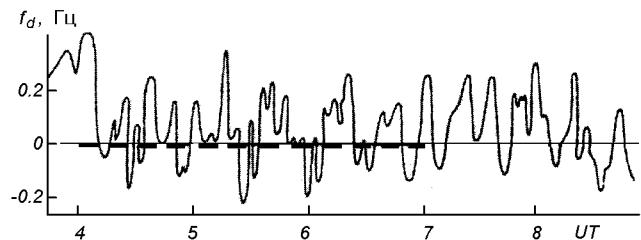


Рис. 6. Временные вариации доплеровского смещения частоты, сопровождавшие возмущение ионосферы мощным радиоизлучением. Штрихи на оси времени — интервал работы возмущающей установки (вблизи г. Нижний Новгород). Ее параметры: эффективная мощность $P_1G_1 \approx 300$ МВт, частота $f_1 = 5.8$ МГц, длительность излучения $\tau_1 = 2$ мин, период цикла $T_1 = 3$ мин. Волна обыкновенной поляризации. Параметры зондирующей установки (вблизи г. Харьков): импульсная мощность $P_2G_2 = 1$ кВт, частота $f_2 = 4.7$ МГц, длительность импульса $\tau_2 = 1$ мс, период $T_2 = 0.01$ с. Волна линейно поляризованная. Обе системы излучали вертикально вверх. Измерения проведены 24 апреля 1984 г.

Мощные взрывы. Проведен анализ результатов наблюдений, выполненных в 80 гг. прошлого века. Взрывы производились в СССР (полигон Н. Земля, Семипалатинск, Капустин Яр), в США (полигон Невада) и в Китае. Энерговыделение при подземных ядерных взрывах (всего 55) изменялось от 1 до 200 кт, при химических взрывах (всего 11) — от 1 до 10 т и подрывах ракет СС-20 (всего 24) — от 0.01 до 0.1 кт. В этих наблюдениях $R \approx \approx 200\ldots10000$ км. При $R \leq 1000$ км надежно регистрировались возмущения с $v \approx 0.3\ldots0.7$ км/с (в нижней и средней ионосфере). Возмущения с $v \approx \approx 2\ldots4$ км/с при $R \sim 1000\ldots10000$ км наблюдались неуверенно.

ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ КАНАЛЫ ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ

Взаимодействие между подсистемами осуществляется при помощи волн (полей) различной физической природы и потоков частиц. Так, из литосферы и приземной атмосферы в геокосмосферу поступает энергия в виде электромагнитного и акустического излучений, квазистатических электрических и маг-

нитных полей, ВГВ и т. п. Вдоль магнитных силовых линий переносятся энергия ионосферных электрических полей и потоки холодной плазмы из ионосферы (днем), вниз устремляются потоки энергичных частиц, потоки холодной плазмы (ночью). Оценены плотности потоков мощности Π_i и Π_p ионосферного электрического поля E_i и высывающихся электронов с энергией 10—100 кэВ (табл. 4).

Волновые процессы. Перенос возмущений от источников энерговыделения до места наблюдения осуществляется при помощи как линейных, так и нелинейных волн (табл. 5). Большинство этих типов волн наблюдалось в наших экспериментах. Примеры линейных волновых возмущений приведены на рис. 7, а нелинейных волн — на рис. 8 и рис. 9.

Стимулированное высывание частиц. Нами предложен достаточно универсальный и эффективный механизм высывания частиц из радиационного пояса, связанный с замедлением электронов в электрическом поле поляризации

$$E_p = E_i |\Delta N / N|,$$

ΔN — возмущение N в Е-области ионосферы с

Таблица 4. Характеристики каналов обмена энергией

Широты	Условия	E_i , мВ/м	Π_i , Вт/м ²	Плотность потока электронов, $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$	Π_p , Вт/м ²
Средние	Не возмущенные	0,3	10^{-7}	$10^5\ldots10^7$	$10^{-10}\ldots10^{-7}$
	Возмущенные	3	10^{-5}	$10^7\ldots10^9$	$10^{-8}\ldots10^{-5}$
Высокие	Не возмущенные	5	$3\cdot10^{-5}$	$10^9\ldots10^{10}$	$10^{-6}\ldots10^{-5}$
	Возмущенные	50	$3\cdot10^{-3}$	$10^{11}\ldots10^{12}$	$10^{-4}\ldots10^{-3}$

Таблица 5. Типы волн, переносящих возмущения на глобальные расстояния

Тип волны	Фазовая скорость, км/с	Период, с	Декремент затухания, км ⁻¹	Среда распространения
Акустическая	0.3—0.7	$10^{-2}\ldots300$	$10^2\ldots10^{-5}$	Атмосфера (≤ 400 км)
ВГВ	0.3—0.7	> 300	$10^{-4}\ldots10^{-3}$	Атмосфера (≤ 400 км)
Медленная	$10^2\ldots1$	$1\ldots10^4$	$2\cdot10^{-3}\ldots2\cdot10^{-4}$	Е-область ионосферы
МГД	$3\cdot10^2\ldots10$	$1\ldots10^3$	$10^{-3}\ldots10^{-4}$	F-область ионосферы
Сейсмическая продольная поперечная	6.5—7.5 4—5	0.1—30 То же	$10^{-5}\ldots10^{-3}$ То же	Литосфера То же
Хантадзе день ночь	~1 ~20	$3\cdot10^4\ldots2\cdot10^5$ $5\cdot10^2\ldots2.4\cdot10^3$	Не оценивался То же	Е-область ионосферы То же
Гиротропная день ночь	40—25 750	$10\ldots10^4$ $10\ldots10^4$	Не оценивался То же	Е-область ионосферы То же
МГД	~1000	$> 10^{-2}$	$< 10^{-5}\ldots10^{-4}$	Ионосфера, магнитосфера

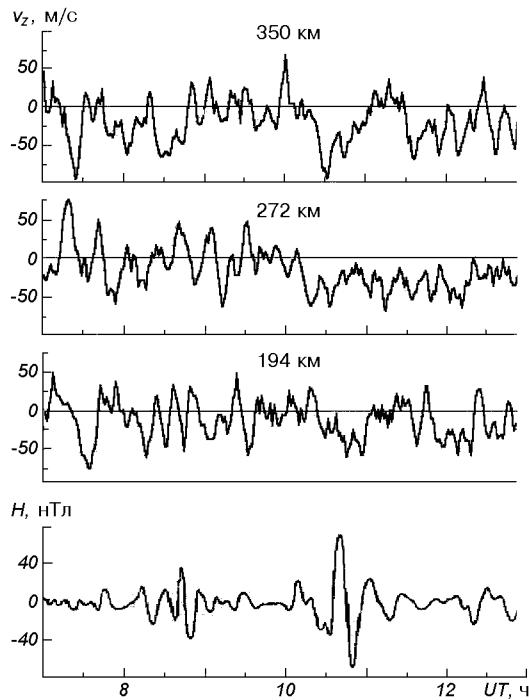


Рис. 7. Магнитоионосферные волновые возмущения, сопровождавшие геокосмическую бурю 25 сентября 1998 г. Измерения вертикальной составляющей скорости движения плазмы выполнены методом некогерентного рассеяния вблизи г. Харькова, а флуктуации горизонтальной составляющей индукции геомагнитного поля — вблизи г. Иркутска [1]

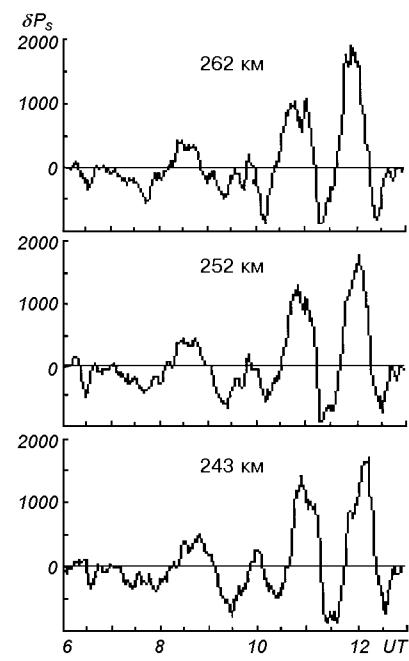


Рис. 8. Нелинейные волны, сопровождавшие геокосмическую бурю 25 сентября 1998 г. [1]. Флуктуации некогерентно рассеянной мощности δP_s приведены в относительных единицах

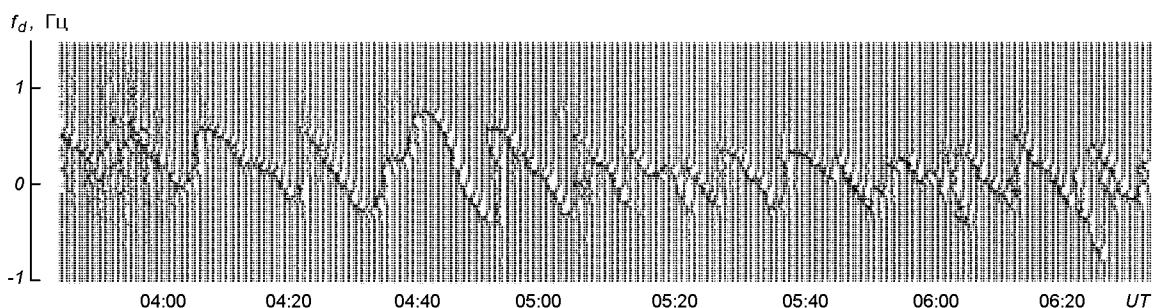


Рис. 9. Временные вариации доплеровского смещения частоты, обусловленные распространением нелинейной волны электронной концентрации. Параметры доплеровского радара: импульсная мощность $P_2G_2 = 1$ кВт, частота $f_2 = 3.5$ МГц, длительность импульса $\tau_2 = 1$ мс, период $T_2 = 0.01$ с. Волна линейно поляризованный. Измерения проведены 15 ноября 2000 г.

горизонтальным размером L_{\perp} . При $E_i \approx 3$ мВ/м, $L_{\perp} \sim 100...1000$ км и $\Delta N/N \approx 1$ имеем $E_p \approx 3$ мВ/м и изменение «поперечной» энергии электронов, захваченных в геомагнитную ловушку, $\Delta\varepsilon_{\perp} \approx eE_p L_{\perp} \approx 0.3...3$ кэВ. Такого уменьшения энергии часто достаточно для стимуляции высыпания электронов. Этот механизм, по-видимому, наблюдался нами при воздействии МР, ЗС, ЗТ, прохождении

СТ и т. п. По измеренным значениям N и ΔN для различных событий оценены плотности потока Π электронов и протонов (табл. 6).

Второй эффективный механизм высыпания электронов связан с генерацией циклотронной неустойчивости. Число n энергичных частиц в силовой трубке и плотность w энергии ОНЧ-волн описываются следующими уравнениями:

Таблица 6. Параметры потоков высыпающихся энергичных частиц и производимая ими ионизация

Событие	Дата	Вид частиц	Высота, км	$\Delta N, m^{-3}$	$q, m^{-3} s^{-1}$	$\Delta q, m^{-3} s^{-1}$	$\Pi, m^{-2} s^{-1}$	$\varepsilon, \text{кэВ}$
МБ	15.06.83	электроны (протоны)	55—60	$3 \cdot 10^8$	10^5	$15 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^7$ ($7.8 \cdot 10^5$)	500 (15000)
МБ	15.05.97	электроны	84	$0.5 \cdot 10^9$	$1.4 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^7$	$3.8 \cdot 10^8$	60
Протонная вспышка	25.02.91	электроны (протоны)	72.5	$5 \cdot 10^9$	10^7	$35 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^9$ ($1.2 \cdot 10^7$)	150 (20000)
СТ (вечер)	24.05.97	электроны	80	10^9	10^7	$3 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^8$	80
СТ (утро)	25.05.97	электроны	80	$6 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^8$	80
Середина ночи	25.05.97	электроны	90	$3 \cdot 10^8$	—	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	40
ЗС	11.08.99	электроны	84	$5 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^7$	60
ЗТ	24.08.99	электроны	84	$4 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^6$	$6.6 \cdot 10^7$	60
Старт КА	15.05.87	электроны	80	10^9	$3 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^8$	80
МР	01.03.91	электроны	88	$3 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^7$	$4.5 \cdot 10^8$	40

$$dn/dt = I_n - \gamma nw, dw/dt = I_w + \Gamma nw - \nu_w w,$$

где I_n и I_w — источники мощности ОНЧ-волн и частиц, $\Gamma \approx 2.5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент связи, ν_w^{-1} — время становления w , $\gamma \approx 10^{12} \text{ м}^3/\text{Дж}\cdot\text{с}$ — коэффициент связи (для геомагнитной оболочки с $L \approx 2$). Тогда $\Pi = \gamma nw/2$. Например, при инжекции ОНЧ-энергии молнии $I_w \approx 10^{-13} \dots 10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^3$, $n \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$ и $\Pi \approx 2 \cdot 10^{10} \dots 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}$. Если в качестве источника частиц выступает солнечный ветер, то при $I_n \approx 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}$ имеем $\Pi \approx 10^8 \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образование ТАИМ целесообразно рассматривать как открытую динамическую нелинейную систему. Энергетика процессов в системе ТАИМ — велика, что обычно приводит к нелинейности физических процессов в ней. Система ТАИМ — открытое как «снизу», так и «сверху» образование, параметры которого изменяются во времени и пространстве.

Высокоэнергичные явления (землетрясения, вулканы, грозы, мощные атмосферные явления, терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, геокосмические бури и т. п.) вызывают целый комплекс процессов в системе ТАИМ, приводят к перестройке характера взаимодействий подсистем, к накоплению и высвобождению энергии.

Активные эксперименты оказались весьма эффективными для моделирования процессов в подсистемах и их взаимодействия. Они показали ограниченность линейного описания системы, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном

и локализованном энерговыделениях.

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

Экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения крупномасштабных и глобальных процессов в геокосмосфере, стимулированных воздействием на ионосферу мощного нестационарного радиоизлучения. Эффекты связаны с проявлением ионосферно-магнитосферного взаимодействия и распространением в горизонтальном направлении акусто-гравитационных волн.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1772.

- Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—9.—С. 57.
- Черногор Л. Ф. Глобальные эффекты при локальном энерговыделении в геосфере // Нетрадиционные научные идеи о природе и ее явлениях. — Гомель, 1990.—Том II.—С. 221.
- Черногор Л. Ф. Геокосмосфера — открытая динамическая нелинейная система // Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна.—2002.—№ 570.—С. 175.

4. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8.—С. 59.

THE EARTH—ATMOSPHERE—GEOSPACE ENVIRONMENT SYSTEM AS AN OPENED DYNAMIC NONLINEAR ONE

L. F. Chernogor

The view that the tectonosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system (TAIMS) can be considered as a complex

open dynamic nonlinear system is justified. The basic aspects of the system paradigm are stated and illustrated by many examples. The trigger mechanisms belong to the most important properties of the system. High-energy phenomena in the system give rise to the entire cluster of processes and to the reconstruction in the subsystem coupling. Active experiments in the TAIMS showed the limitation of the linear description of the subsystem response to powerful energy releases, allowed us to establish the possibility of large-scale and global-scale perturbation initiation from local and localized energy releases, as well as revealed and identified the types of waves transferring these disturbances. It is established that energetic particle precipitation from the magnetosphere at middle latitudes accompanies the majority of nonsteady processes in the TAIMS.

УДК 537.591

И. И. Залюбовский, В. М. Карташев, В. Е. Ковтун,
О. К. Минко, Е. С. Шматко

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Всплески потока быстрых нейтронов
на поверхности Земли как завершение процесса
высыпания энергичных протонов
из зон захваченной радиации

Розглядається можливість непрямого наземного детектування сплесків енергійних протонів, що висипаються із внутрішнього радіаційного поясу Землі. Показано, що сплески протонів трансформуються у сплески швидких атмосферних нейтронів. Ефективна реєстрація сплесків нейтронів можлива на низьких широтах за допомогою мюонно-нейтронного сцинтиляційного телескопа площею 5 m^2 .

ВВЕДЕНИЕ

В работе [2] описана физическая модель солнечно-земного триггерного процесса, заключительной стадией которого служат кратковременные всплески потоков электронов, высыпающихся из внутреннего радиационного пояса Земли. Прежде чем поглотиться в атмосфере, электроны испускают всплески частично когерентного синхротронного ВЧ-радиоизлучения, которые можно регистрировать наземными устройствами. Там же [2] предложен проект наземной нелокальной экспериментальной установки с пунктами базирования в Харькове, Киеве и Евпатории, с помощью которой предполагается изучить механизм высыпания энергичных электронов и весь солнечно-земной триггерный процесс в целом. Регистрация высыпающихся вместе с электронами энергичных протонов не была предусмотрена, главным образом по причине удорожания проекта. Между тем метод косвенного наземного их детектирования есть и будет описан ниже.

ПРОТОНЫ ВО ВНУТРЕННЕМ РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ ЗЕМЛИ

Внутренние зоны захвата невозмущенной магнитосфери Земли заполняются протонами (и частично электронами) в результате постоянно действующего нейтронно-альбедного механизма космических лучей [1]. Согласно нему примерно 20 % нейтронов, рожденных в ядерных взаимодействиях галактических космических лучей в верхней атмосфере Земли, испускается в обратном направлении с интенсивностью порядка $1 \text{ см}^{-2}\text{s}^{-1}$. Достигая внутренних зон захвата и распадаясь на протоны, электроны и антинейтрино, нейтроны обеспечивают наблюдаемые поток и энергетический спектр захваченных протонов. В возмущенной магнитосфере увеличивается утечка протонов из радиационных поясов, но включаются дополнительные механизмы их пополнения. При возвращении магнитосфера в исходное состояние поток захваченных протонов восстанавливается, и баланс между плотностью

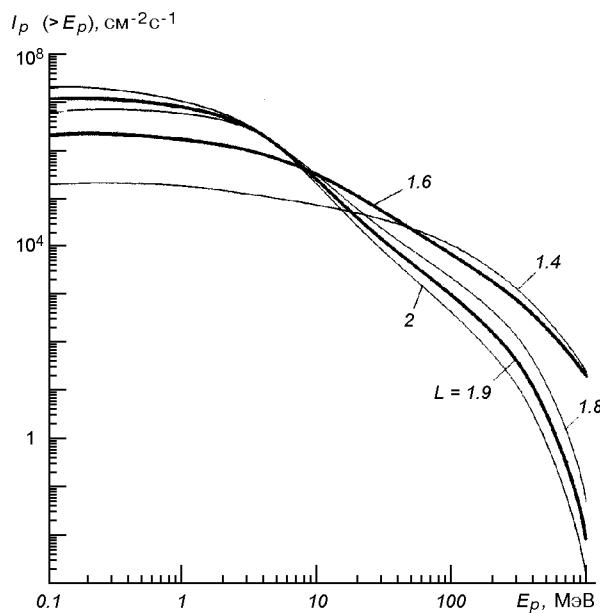


Рис. 1. Интегральные энергетические спектры захваченных протонов в области геомагнитного экватора на различных дрейфовых L-оболочках внутреннего радиационного пояса в период минимума солнечной активности. $L = 1.9$ — широта Киева и Харькова, $L = 1.6$ — широта Евпатории

энергии магнитного поля и плотностью кинетической энергии захваченных частиц снова соблюдается.

На рис. 1 показаны интегральные энергетические спектры захваченных протонов в области геомагнитного экватора на различных дрейфовых L-оболочках внутреннего радиационного пояса в период минимума солнечной активности [4]. Энергетические спектры, соответствующие широте Киева и Харькова, принадлежат $L = 1.9$, а широте Евпатории — $L = 1.6$. Очевидно, что спектры становятся жестче при движении к низким широтам, и при энергии протонов $E_p \sim 1$ ГэВ их интенсивность на дрейфовых оболочках, замыкающихся, соответственно, на широте Евпатории и широте Киева и Харькова, различаются более чем на три порядка. Поэтому косвенное наблюдение высывающихся протонов на низких широтах, как будет показано в дальнейшем, более эффективно, чем на высоких, несмотря на значительную устойчивость внутренних зон захваченной радиации.

О ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

Прямое наблюдение высывающихся протонов и электронов на искусственных спутниках Земли,

орбиты которых проходили ниже радиационных поясов, проводилось неоднократно.

Главными недостатками этих наблюдений, по мнению авторов, были:

- 1) небольшая площадь детекторов заряженных частиц,
- 2) сравнительно большое время накопления числа импульсов,
- 3) отсутствие привязки к определенной дрейфовой L-оболочке вследствие быстрого движения спутника,
- 4) высокая стоимость спутниковых экспериментов,
- 5) ограниченное время их проведения.

Главным достоинством следует признавать сам факт прямого детектирования и идентификации частиц. Целенаправленные баллонные эксперименты не получили распространения. Обычно с их помощью решались другие задачи. Тем не менее, именно на высотных аэростатах возможна прямая регистрация энергичных высывающихся заряженных частиц в пределах одной и той же магнитной оболочки. Высыпающиеся электроны с кинетической энергией более 20 МэВ и протоны с энергией более 200 МэВ достигают высоты полета аэростата (30—33 км). Согласно [5] электроны с такой энергией в радиационных поясах отсутствуют, по крайней мере в спокойной магнитосфере. Относительно недавние измерения [3] показывают, что во внутреннем радиационном поясе есть потоки захваченных электронов с энергией 15÷200 МэВ, но их интенсивность на четыре порядка ниже.

Иллюстрацией всему сказанному может послужить эксперимент физиков Московского инженерно-физического института на высотном аэростате, в котором были зарегистрированы всплески потоков энергичных электронов и протонов как побочный продукт наблюдения энергичных космических гамма-квантов при помощи гамма-телескопа «Наталия-1» [7, 8]. Заряженные частицы детектировались тремя каналами интенсиметров, входящих в систему защиты основного канала регистрации космических гамма-квантов с энергией $E_\gamma > 5$ МэВ.

На рис. 2 показан пример записи серии всплесков высывающихся во время магнитосферной бури зараженных частиц, который взят из работы [7].

Длительность отдельных всплесков не превосходила времени накопления импульсов, равного 5 с. В канале интенсиметров I2 регистрировались электроны и протоны с энергиями $E_e \geq 20$ МэВ и $E_p > 500$ МэВ, приходящие из верхней полусфера. По оценке [7] плотность потока высывающихся протонов с энергией $E_p > 500$ МэВ во всплеске составляла $I_p (> 500 \text{ МэВ}) \approx 8 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$, что сравнимо с плотностью потока захваченных частиц (рис. 1). К сожалению, аэростатные эксперименты,

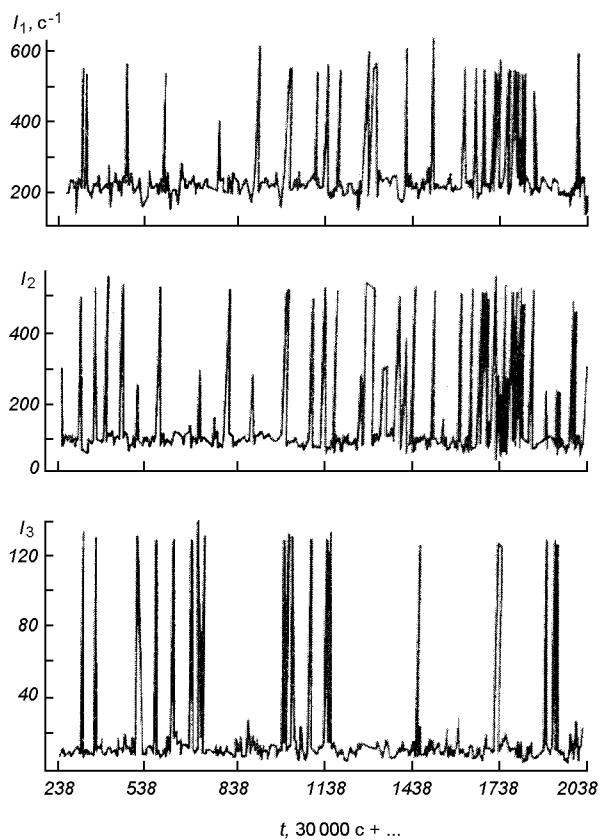


Рис. 2. Всплески интенсивности заряженных частиц, наблюдавшиеся 20 августа 1979 г. в полете аэростата на высоте 30—33.5 км и северной магнитной широте 46° [7]. I1 — электроны с энергией $E_e > 20$ МэВ и протоны с энергией $E_p > 100$ МэВ в апертуре телескопа. I2 — электроны с энергией $E_e > 20$ МэВ, протоны с энергией $E_p > 500$ МэВ в апертуре телескопа с направлением из верхней полусфера. I3 — электроны с энергией $E_e > 1.5$ МэВ и протоны с энергией $E_p > 12$ МэВ, приходящие из всех направлений

описанные в работах [7, 8], продолжения не имели.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ

Протоны — сильноионизирующие частицы. При низких энергиях ионизация — основной канал их потерь энергии. Минимум ионизации достигается в области кинетической энергии протонов $E_p \sim 2m_p c^2$ (m_p — масса протона, c — скорость света). При входе в атмосферу из околосеменного пространства протоны с энергией менее 500 МэВ поглощаются в атмосфере за счет ионизации, не достигнув высоты 15 км. Критическая энергия для протонов составляет 1 ГэВ. Начиная с этой энергии, ядерные неупру-

гие соударения с рождением вторичных адронов (главным образом, пионов) становятся превалирующими над ионизацией. Энергетический порог рождения пионов в pp-столкновениях составляет $E_p \approx 290$ МэВ, но их заметный выход наблюдается при достижении протоном критической энергии. В среднем половина энергии протона уходит на рождение пионов. Еще одна часть энергии идет на ядерные расщепления, результатом которых является вылет из возбужденного ядра нейтронов, протонов, дейtronов, альфа-частиц и более тяжелых осколков испарительного происхождения. Средняя энергия ядерных расщеплений, по крайней мере в интервале энергий налетающих протонов 1— 10^3 ГэВ, слабо зависит от первичной энергии и составляет для воздуха 400 МэВ/ядро [10]. Вторичные тяжелые заряженные частицы поглощаются за счет ионизации, поэтому цепь ядерных расщеплений могут продолжить только заряженные пионы (нейтральные пионы быстро распадаются) и нейтроны. Первичный протон, если его энергия достаточно велика, сохраняется, и может перезарядиться в нейtron. В любом случае остается лидирующий нуклон, который участвует в ядерно-каскадном процессе, рождая пионы и производя ядерные расщепления. Таким образом, ядерные расщепления могут происходить по всей глубине атмосферы, а поверхности Земли достигают быстрые нейтроны даже в том случае, когда лидирующий нуклон уже поглотился. Коэффициент связи потока быстрых нейтронов на уровне моря и потока протонов с энергией $E_p \sim 1$ ГэВ за пределами атмосферы составляет $2 \cdot 10^{-3}$ [6]. Протоны с меньшими энергиями на уровне моря нейтроны не образуют. О потоке галактических протонов с энергией $E_p > 6$ ГэВ можно судить по потоку атмосферных мюонов на уровне моря, которые рождаются в распадах заряженных пионов [6]. В радиационных поясах таких протонов не наблюдается, если не предполагать каких-либо ускорительных механизмов. Поэтому мюонные потоки на поверхности Земли можно использовать только для контроля галактического протонного потока, на фоне которого возникают протонные всплески магнитосферного происхождения.

МЮОННО-НЕЙТРОННЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВСПЛЕСКОВ ПОТОКА ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ

Структурная схема проекта мюонно-нейtronного сцинтилляционного телескопа изображена на рис. 3. Телескоп состоит из двух рядов пластмассо-

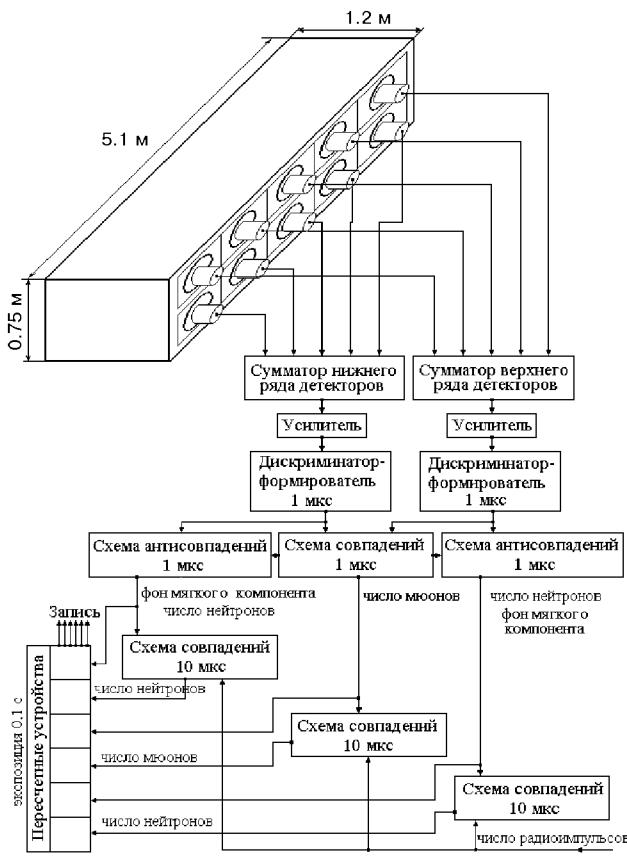


Рис. 3. Структурная схема проекта мюонно-нейтронного сцинтилляционного телескопа, предназначенного для регистрации всплесков потока высывающихся магнитосферных протонов с энергией $E_p > 1$ ГэВ.

вых сцинтилляторов с площадью каждого 5 м^2 и толщиной 5 см. Для подавления фона мягкого компонента космических лучей и окружающей среды каждый ряд со всех сторон окружен слоем свинца толщиной 5 см. Верхний слой свинца служит также размножителем быстрых нейтронов (85 % от полного числа при доле атмосферных нейтронов 15 %). Быстрые нейтроны упруго рассеиваются на ядрах водорода в верхнем ряде детекторов и регистрируются по протонам отдачи вместе с атмосферными мюонами и остаточным фоном мягкого компонента. Мюоны детектируются независимо методом совпадений во времени импульсов из верхнего и нижнего рядов, а затем эти импульсы вычитаются из общего их числа в каждом ряде при помощи схем антисовпадений. Остаточный фон мягкого компонента частично дискриминируется, но полностью из общего числа счетов не исключается. Кроме того, в каждом ряде могут регистриро-

ваться мюоны, не попавшие в телесный угол телескопа, а в нижний ряд могут попадать быстрые нейтроны, пришедшие с боков. Поэтому непрерывный поток быстрых нейтронов, образованный потоком галактических космических лучей и регистрируемый верхним рядом детекторов, будет сопровождаться некоторым посторонним фоном. Однако измерение непрерывного потока быстрых нейтронов в данном случае не является самоцелью. Мало того, этот посторонний фон может быть оценен на основе показаний схем антисовпадений. Окончательное выделение нейтронных импульсов, принадлежащих нейтронным всплескам, производится схемой совпадений с разрешающим временем 10 мкс в случае попадания в этот интервал радиоимпульсов, входящих в состав всплесков высокочастотного синхронного радиоизлучения высывающихся электронов [9]. Разрешающее время специально увеличено на порядок, чтобы нивелировать различие в тонкой временной структуре электронных и протонных всплесков, создаваемой, соответственно, электронно-циклотронной и протонно-циклотронной неустойчивостями в зоне захвата. Следует заметить, что совпадениями радиоимпульсов с нейтронными импульсами, вызванными высывающимися протонами, исключаются непрерывный фон нейтронов и остаточный фон мягкой компоненты и мюонов, поэтому отпадает необходимость в идентификации нейтронных всплесков на фоне флюктуаций потоков другой природы.

Ожидаемое число импульсов, регистрируемое мюонно-нейтронным телескопом за время отдельного всплеска, может быть оценено в результате использования следующих предположений: 1) высapsulation протонов приводит к полному опустошению локальной зоны их захвата; 2) в каждом полушарии Земли высывается половина захваченных протонов; 3) длительность всплеска высывающихся протонов равна половине баунс-периода для захваченных, т. е. порядка 0.1 с; 4) развитие неустойчивости захваченных протонов происходит в области геомагнитного экватора; 5) при высapsulation в атмосферу плотность потока протонов по сравнению с экваториальной возрастает на порядок, благодаря сохранению магнитного потока через орбиты вращающихся частиц; 6) регистрируются нейтроны, образованные протонами с энергией $E_p \geq 1$ ГэВ; 7) коэффициент связи нейтронных и протонных потоков равен $2 \cdot 10^{-3}$; 8) соотношение атмосферных нейтронов и нейтронов, размноженных в свинцовой защите, соответственно, 15 % и 85 %; 9) эффективность регистрации верхним рядом детекторов равна 0.5 из-за рассеяния атмосферных и размножающихся нейтронов в свинце в

заднюю полусферу; 10) при однократном рассеянии в пластмассовом сцинтилляторе нейtron передает протону в среднем половину своей кинетической энергии; 11) площадь верхнего ряда детекторов равна 5 м^2 .

Оценки приводят к следующему результату: для дрейфовой магнитной оболочки с $L = 1.9$ ожидаемое число импульсов равно 1.4 за время всплеска на всю площадь телескопа, для $L = 1.6$ — 3300 импульсов. По самым максимальным оценкам число импульсов от фоновых нейтронов, регистрируемое телескопом, не будет превосходить 15 за время всплеска. Экспериментальные измерения [9] показали, что за время всплеска регистрируется не более 5000 радиоимпульсов от высыпающихся электронов. В этом случае только 1.5 фоновых нейтронных импульсов могут случайно совпасть с радиоимпульсами. Следует иметь в виду, что в силу локальности опустошающихся в результате высыпаний зон захвата и различных способов регистрации электронных и протонных событий, нейтронные всплески будут наблюдаться существенно реже, чем радиовсплески.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно констатировать, что описанный мюонно-нейтронный сцинтилляционный телескоп отвечает задаче детектирования протонных высыпаний из зон захваченной радиации. Авторы считают, что в пределах Украины оптимальное место его расположения должно выбираться на территории Евпаторийского Центра приема научной информации, где планируется сооружение одного из пунктов наземной нелокальной экспериментальной установки для наблюдения солнечно-земных процессов [2]. На геомагнитной широте Евпатории ($\lambda \approx 38^\circ$) предельный импульс геомагнитного обрезания вертикального потока галактических протонов $P_{\lim}(\lambda) = 14.8 \cos^4 \lambda \approx 5.7 \text{ ГэВ/с}$, поэтому фоновый поток нейтронов меньше, а ожидаемые нейтронные всплески интенсивнее, чем на более высоких широтах, вследствие формирования сравнительно жесткого энергетического спектра у захваченных на $L = 1.6$ протонов.

Единственный существующий в Украине нейтронный супермонитор принадлежит Главной астрономической обсерватории (ГАО НАНУ) и расположен в пос. Дымер в 50 км севернее Киева. Если

включить его в состав наземной нелокальной экспериментальной установки, то рядом с ним также необходимо сооружать радиофизический пункт регистрации электронных высыпаний.

1. Вернов С. Н., Вакулов П. В., Горчаков Е. В., Логачев Ю. И. Радиационные пояса Земли и космические лучи. — М.: Просвещение, 1970.—128 с.
2. Власенко В. П., Залюбовский И. И., Карташев В. М. и др. Перспективы наземного исследования солнечно-земных связей // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 7—19.
3. Воронов С. А., Гальпер А. М., Колдашов С. В. и др. Энергетические и пространственные распределения электронов с энергией более 15 МэВ в радиационном поясе Земли // Изв. РАН. Сер. физ.—1997.—61, № 6.—С. 1126—1129.
4. ГОСТ 25645.138-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока протонов. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
5. ГОСТ 25645.139-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
6. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. — М.: Наука, 1975.—462 с.
7. Июдин А. Ф., Кириллов-Угрюмов В. Г., Котов Ю. Д. и др. Импульсное высыпание протонов с $E_p > 500 \text{ МэВ}$ во время магнитной бури с оболочки $L = 2$ // Письма в ЖЭТФ.—1983.—38, вып. 11.—С. 553—556.
8. Июдин А. Ф., Кириллов-Угрюмов В. Г., Котов Ю. Д. и др. Высыпание энергичных протонов на средних широтах, связанное с импульсным возмущением магнитосферы // Письма в ЖЭТФ.—1985.—41, вып. 4.—С. 140—143.
9. Карташев В. М., Лазарев А. В., Сорока Д. В., Шматко Е. С. Всплески синхротронного радиоизлучения электронов, высыпающихся из внутреннего радиационного пояса Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 2.—С. 165—174.
10. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. — М.: Изд-во Москов. ун-та, 1988.—320 с.

BURSTS OF FAST NEUTRON FLOWS ON THE EARTH'S SURFACE AS THE COMPLETION OF THE PROCESS OF ENERGETIC PROTON SCATTERING FROM THE CAPTURED RADIATION ZONES

I. I. Zalyubovskiy, V. M. Kartashev, V. E. Kovtun,
O. K. Minko, E. S. Shmatko

The possibility of indirect ground-based detection of bursts of energetic proton scattering from the Earth's internal radiation zone is considered. The bursts are shown to be transformed into bursts of fast atmospheric neutrons. Efficient detection of the neutron bursts is possible at low latitudes when muon-neutron scintillation telescope with an area of five square metres is used.

УДК 533.951

А. С. Парновский, О. К. Черемных

Інститут космічних дослідень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Аналіз спектра собственных МГД-возмущений «теплої» плазми во внутренней магнитосфере Земли

Досліджується спектр власних МГД-збурень магнітосферної плазми. Показано, що у системі з «жорсткими» граничними умовами на іоносфері основними типами власних коливань при малому тиску є торoidalні альвенівські та іонно-звукові моди. Із збільшенням тиску у магнітосферній плазмі також генеруються полоїdalні альвенівські моди, які за певних співвідношень між величиною тиску та його профілем переходят у нестійкий режим. У цьому випадку можна говорити про нестійкі балонні моди. Звертається увага на істотний вплив граничних умов на спектр збурень у магнітосферній плазмі.

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Ранее, в работе [1] была получена система уравнений малых колебаний магнитосферной плазмы. Было показано, что если вектор смещения элемента объема плазмы ξ разложить по тройке ортогональных векторов

$$\xi = \xi \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} + \eta \frac{[\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} + \tau \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2},$$

где ψ — полоидальный магнитный поток, определяющий структуру геомагнитного поля

$$\mathbf{B} = [\nabla \psi \times \nabla \varphi],$$

то уравнения малых колебаний магнитосферной плазмы для осесимметричного случая ($\partial/(\partial\varphi) = 0$) имеют вид

$$\Omega^2 \xi + \frac{a}{c^6} \left(\frac{\xi'}{a} \right)' + \frac{4}{ac^2} \left(T_0 + \frac{\alpha \beta}{\gamma} \xi \right) = 0, \quad (1)$$

$$\Omega^2 \eta + \frac{1}{c^6} \eta'' = 0, \quad (2)$$

$$\Omega^2 \tau + \frac{T'_0}{c^3} = 0. \quad (3)$$

Здесь

$$T_0 = \beta \left[\frac{1}{c^3} \left(\frac{c^6}{a} \tau \right)' - \frac{4c}{a^2} \xi \right],$$

$\alpha = -\frac{L}{p} \frac{dp}{dL}$ — безразмерный профиль давления, $\beta = \gamma p / B_0^2$ — безразмерное давление (в отличие от обычного плазменного параметра $8\pi p / B_0^2$), $\gamma = 5/3$ — показатель адиабаты, $x = \sin\theta$ — синус полоидального угла (геомагнитной широты), $x_0 = \sin\theta_0$ — синус полоидального угла точки пересечения силовой линии геомагнитного поля с ионосферой, $L = (1 - x_0^2)^{-1}$ — параметр Мак-Илвайна, $a = 1 + 3x^2$ — геометрический коэффициент, связанный с дипольной геометрией магнитного поля, $c = 1 - x^2$; штрихами обозначены производные по x .

«ЖЕСТКИЕ» ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Для изучения спектра собственных колебаний магнитных оболочек уравнения (1)–(3) следует дополнить граничными условиями. Обычно в качестве граничных условий выбирают так называемые «жесткие» граничные условия (см. [2, 3]). В этом

случае предполагается, что силовые линии магнитного поля опираются на ионосферу с бесконечной проводимостью и «вморожены» в последнюю. Тогда возмущенные величины обращаются в нуль на идеально проводящей невозмущенной поверхности ионосферы на каждой магнитной силовой линии, т. е. имеют место соотношения

$$\xi(\pm x_0) = \eta(\pm x_0) = \tau(\pm x_0) = 0. \quad (4)$$

Ниже мы ограничимся анализом первого и третьего уравнений системы (1)–(3), поскольку второе уравнение описывает хорошо известные тороидальные альвеновские моды [2].

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

В работе [1] было получено аналитическое решение для спектра собственных колебаний при $\beta = 0$. В этом случае частоты тороидальных и полоидальных альвеновских волн описываются одной и той же формулой

$$\Omega_n = \frac{\pi n}{x_0} \sqrt{2 \int_0^L c^3 dx}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

полученной в ВКБ-приближении (см. рис. 1).

Ситуация, когда давления в плазме нет, т. е. $\beta = 0$, является идеализированной. В реальных условиях $\beta \neq 0$ и ситуация существенно усложняется. Численное решение уравнений (1) и (3) с граничными условиями (4) дает спектр колебаний, приведенный на рис. 2. Представленные на этих рисунках кривые являются несколько необычными, поскольку можно было ожидать, что при $\beta \rightarrow 0$

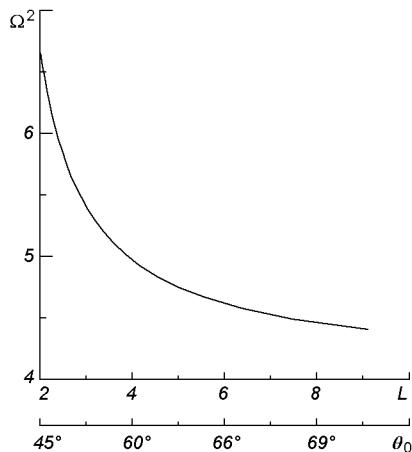


Рис. 1. Собственная частота первой альвеновской моды при нулевом давлении

частоты колебаний будут стремиться к частотам, определяемым формулой (5). Однако из численных расчетов этого не следует. Для объяснения полученного результата ниже мы приведем некоторые соображения и покажем, что вид спектра собственных колебаний обусловлен «правилами отбора», вытекающими из граничных условий (4).

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Проанализируем уравнения (1) и (3) с граничными условиями (4) при $\beta \ll 1$ методами теории возмущений. Полагая в интересующих нас уравнениях $x = x_0$, получаем следующие дифференциальные соотношения между ξ и τ :

$$\begin{aligned} \xi''(x_0) + A\xi'(x_0) + \beta B\tau'(x_0) &= 0, \\ \beta [\tau''(x_0) + C\tau'(x_0) + D\xi'(x_0)] + O(\beta^2) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Конкретный вид коэффициентов A, B, C, D для дальнейшего анализа нам не важен. Важно лишь, что они не зависят от β , и мы будем считать их порядка единицы.

В соответствии с теорией возмущений представим амплитуды возмущений в виде

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 + \beta \xi_1, \\ \tau &= \tau_0 + \beta \tau_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получаем в нулевом и первом приближениях по параметру β соотношения

$$\begin{aligned} \xi''_0(x_0) + A\xi'_0(x_0) &= 0, \\ \xi''_1(x_0) + A\xi'_1(x_0) + B\tau'_0(x_0) &= 0, \\ \tau''_0(x_0) + C\tau'_0(x_0) + D\xi'_0(x_0) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Предположим, что в рассматриваемой системе с малым давлением доминируют полоидальные альвеновские моды, так что $\tau_0 = 0$. Тогда из (8) следует соотношение

$$\xi'_0(x_0) = \xi''_0(x_0) = 0,$$

из которого с учетом граничного условия (4) вытекает, что $\xi_0 = 0$. Следовательно, в системе возможны собственные полоидальные колебания с $\xi_0 = \tau_0 = 0$, существенно деформированные давлением.

Подробное обоснование этого факта приведено в Приложении. Более того, даже рассмотрение граничных условий третьего рода не снимает эти «правила отбора», хотя они и добавляют ряд интересных эффектов, таких как появление «квазижелобковых» мод.

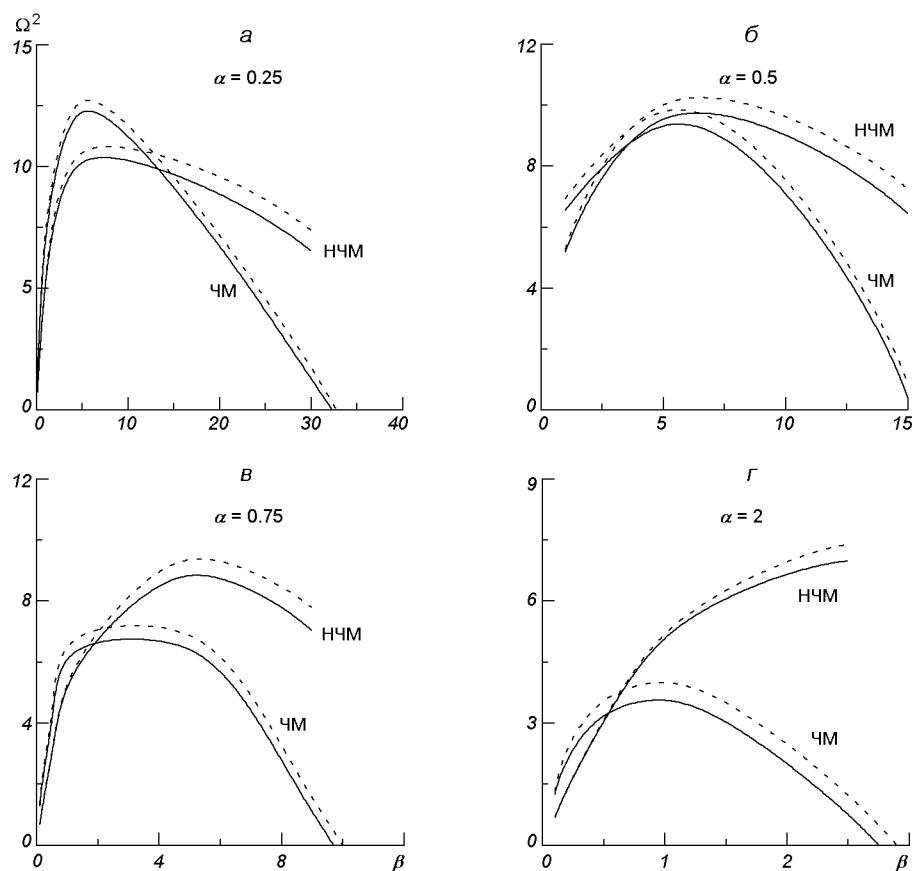


Рис. 2. Спектр первых собственных мод собственных колебаний при различных значениях профиля давления α ; ЧМ, НЧМ — четные и нечетные моды; сплошная линия — для $L = 10$; штриховая — для $L = 4$

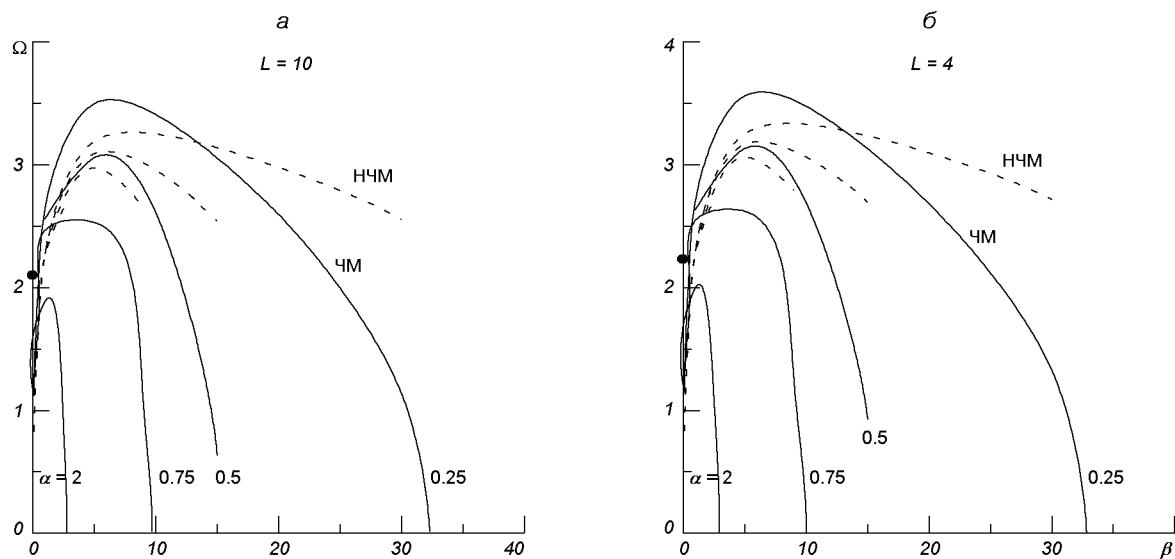


Рис. 3. Полный спектр первых собственных мод собственных колебаний на различных магнитных оболочках: a — $L = 10$, b — $L = 4$

Противоположный случай, когда $\xi_0 = 0$, приводит к соотношениям

$$\tau'_{\text{0}}(x_0) + C\tau'_{\text{0}}(x_0) = 0,$$

$$\xi''_{\text{1}}(x_0) + A\xi'_{\text{1}}(x_0) + B\tau'_{\text{0}}(x_0) = 0$$

с амплитудой $\tau_0 \neq 0$.

Таким образом, уравнения (1) и (3) при малом давлении имеют два качественно разных типа решений:

$$\xi = \beta\xi_1, \quad \tau = \tau_0 + \beta\tau_1 \quad (9)$$

и

$$\xi = \beta\xi_1, \quad \tau = \beta\tau_1. \quad (10)$$

Очевидно, что при $\beta \rightarrow 0$ доминирующим является решение (9), амплитуда τ_0 которого описывает ионно-звуковую моду и удовлетворяет уравнению

$$\Omega^2\tau_0 + \beta \left[\frac{1}{c^3} \left(\frac{c^6}{a} \tau_0 \right)' \right]' = 0. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) было ранее найдено в работе [1]:

$$\Omega_n = \frac{\sqrt{\beta}\pi n}{2 \int_0^x \sqrt{a} dx}. \quad (12)$$

При малом β оно хорошо согласуется с кривыми на рис. 2. Отметим (см. (9)), что ионно-звуковые колебания генерируют полоидальные альвеновские моды с малой амплитудой.

С увеличением давления решения (9) и (10) качественно совпадают друг с другом и описывают зацепленные между собой колебания полоидальной альвеновской и ионно-звуковой мод с одинаковыми амплитудами. При $\alpha\beta/\gamma > 1$ полоидальные альвеновские моды становятся неустойчивыми, и в этом случае они называются баллонными. По мере приближения к границе устойчивости их частота уменьшается, и на границе устойчивости выполняется условие $\Omega^2 = 0$, что позволяет найти аналитическое выражение для границы устойчивости.

УСТОЙЧИВОСТЬ

Граница устойчивости баллонных мод соответствует условию $\Omega^2 = 0$. Численные расчеты показывают, что при $\alpha \sim \beta \sim 1$ неустойчивость возникает на первой четной моде. Уравнения (1) и (3) на границе устойчивости имеют вид

$$\left(\frac{\xi'}{a} \right)' + \frac{4c^4}{a^2} \left(T_0 + \frac{\alpha\beta}{\gamma} \xi \right) = 0, \quad (13)$$

$$T'_0 = 0 \quad (14)$$

и могут быть решены аналитически путем сведения к интегральному уравнению. Проинтегрировав их по x дважды, с учетом граничных условий получаем

$$1 = \int_0^{x_0} a \int_0^x \frac{4c^4}{a^2} \left(T_0 + \frac{\alpha\beta}{\gamma} \xi \right) dt dx, \quad (15)$$

$$0 = \int_0^{x_0} \frac{a}{c^6} \left(\frac{T_0}{\beta} \int_0^x c^3 dt + \int_0^x \frac{4c^4}{a^2} \xi dt \right) dx, \quad (16)$$

$$\tau = \frac{a}{c^6} \left(\int_0^x \frac{4c^4}{a^2} \xi dt - \int_0^x c^3 dt \frac{\int_0^{x_0} \frac{a}{c^6} \int_0^x \frac{4c^4}{a^2} \xi dt dx}{\int_0^{x_0} \frac{a}{c^6} \int_0^x c^3 dt dx} \right). \quad (17)$$

Исключив τ , получаем уравнение для границы устойчивости:

$$1 = \frac{\alpha\beta}{\gamma} \int_0^{x_0} \frac{4c^4}{a^2} \xi \int_x^{x_0} adt dx - \frac{\int_0^{x_0} \frac{4c^4}{a^2} \xi \int_x^{x_0} \frac{a}{c^6} dt dx}{\int_0^{x_0} \frac{c^3(a + \beta c^6)}{\beta a} \int_x^{x_0} \frac{a}{c^6} dt dx} \int_0^{x_0} \frac{4c^4}{a^2} \int_x^{x_0} adt dx. \quad (18)$$

При использовании пробной функции $\xi = 1 - x^2/x_0^2$, хорошо аппроксимирующей результаты численных расчетов, из уравнения (18) вытекает следующее аналитическое выражение для границы устойчивости:

$$\alpha = \frac{K_1(\theta_0)}{\beta} + K_2(\theta_0). \quad (19)$$

Вид коэффициентов K_1 и K_2 довольно громоздок, и мы ограничимся приведением их значений при некоторых значениях граничного угла (табл. 1).

Сравнение результатов численных расчетов, приведенных ранее в работе [1] и по формуле (19), показало, что кривые границы устойчивости баллонных мод практически неразличимы в обоих случаях.

Таблица 1. Значения коэффициентов K_1 и K_2 в зависимости от граничного угла

θ_0 , град	K_1	K_2
45	1.83	5.2
50	1.54	5.0
60	1.17	4.8
72	0.95	4.7

ВЫВОДЫ

В работе продемонстрировано, что использование «жестких» граничных условий на ионосфере приводит к существенной модификации спектра собственных МГД-колебаний в магнитосфере Земли. Показано, что при малом давлении существуют хорошо известные тороидальные альвеновские моды и ионно-звуковые моды с дисперсией вида $\Omega \sim \sqrt{\beta}$. При достаточно больших давлениях в магнитосферной плазме генерируются полоидальные альвеновские моды, зацепленные с ионным звуком, которые с дальнейшим ростом давления переходят в неустойчивый режим. В работе получено аналитическое выражение для границы устойчивости этих мод.

Необходимо отметить, что полученные в работе результаты очень чувствительны к граничным условиям для возмущений на ионосфере. Поэтому вопрос о граничных условиях для собственных колебаний МГД-мод в магнитосфере становится очень актуальным. В то же время в работах, посвященных подобной проблематике (например [4]), как правило, не учитывается кривизна силовых линий геомагнитного поля, которая играет одну из важнейших ролей в системе магнитосфера — ионосфера. Наши выводы по поводу граничных условий подтверждаются экспериментальными работами по активному акустическому воздействию на ионосферу, указывающими, что изменение граничных условий оказывает сильнейшее воздействие на характеристики волновых процессов в ионосфере (С. А. Сорока, частное сообщение).

ПРИЛОЖЕНИЕ

В пределе $\beta = 0$ система (1), (3) принимает вид

$$\Omega^2 \xi + \frac{a}{c^\beta} \left(\frac{\xi'}{a} \right)' = 0,$$

$$\Omega^2 \tau = 0.$$

Решением этой системы являются $\xi = \xi_0(x)$ и $\tau = 0$. Конкретный вид функции ξ_0 не принципиален, важно лишь то, что она не имеет особенностей, ненулевая, и не зависит от β и τ .

Теперь рассмотрим поведение системы (1), (3) при малом ненулевом β . Предположим, что полоидальная альвеновская ветвь все же существует, и при малом β величина Ω^2 конечная, отличная от нуля (см. рис. 2). Поскольку функция ξ отличается от функции ξ_0 на величину порядка β , то ξ' имеет тот же порядок по β , что и ξ .

Таким образом, система содержит три функции, соотношение между которыми определяет вид решения. Все возможные варианты этих соотношений сведены в табл. 2. Видно, что реализуются случаи 1 и 3, когда существование полоидальной альвеновской ветви все же возможно, но при частотах порядка β^{-1} , что объясняет убывание частоты при увеличении β . В случае 3, помимо этого требования, также необходимо, чтобы $\tau' \sim \beta^{-1}$ и $\tau \ll 1$.

Итак, наше предположение о реализации альвеновской ветви при малом ненулевом β привело к противоречию, из чего мы можем сделать вывод об ее отсутствии.

Таблица 2. Анализ возможных соотношений между собственными функциями возмущений.

ξ	$\tau' < \tau$	$\tau' \sim \tau$	$\beta\tau' < \tau$			$\beta\tau' \sim \tau$	$\beta\tau' < \tau < \tau'$				
			$\beta\xi < \tau$	$\beta\xi \sim \tau$	$\beta\xi > \tau$						
$\xi \ll \min(\tau, \tau')$	2	2			3		1				
$\xi \sim \min(\tau, \tau')$		2									
$\min(\tau, \tau') \ll \xi \ll \max(\tau, \tau')$		3									
$\xi \sim \max(\tau, \tau')$		1			2						
$\xi \gg \max(\tau, \tau')$	1	4									

Примечания:

1 — из уравнения (3) получается, что $\Omega \sim \beta^{-1}$;

2 — запрещено уравнением (3);

3 — при этом должно выполняться условие $\tau' \sim \beta^{-1}$, что возможно лишь при $\Omega \sim \beta^{-1}$;

4 — запрещено граничными условиями (4), так как при этом $(ca^{-2}\xi)' = 0$, откуда $\xi \equiv 0$.

1. Черемных О. К., Бурдо О. С., Кременецкий И. А., Парновский А. С. К теории МГД-волн во внутренней магнитосфере Земли // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 44—63.
2. Cheng C. Z., Chang T. C., Lin C. A., Tsai W. H. Magnetohydrodynamic theory of field line resonances in the magnetosphere // J. Geophys. Res.—1993.—98A, N 7.—P. 11339—11347.
3. Hameiri E., Laurence P., Mond M. The ballooning instability in space plasmas // J. Geophys. Res.—1991.—96.—P. 1513—1518.
4. Yoshikawa A., Itonaga M., Fujita S., et al. Eigenmode analysis of field line oscillations with the ionosphere — atmosphere — solid Earth electromagnetic coupled system // J. Geophys. Res.—1999.—104A, N 12.—P. 28437—28457.

**ANALYSIS OF SPECTRUM OF “WARM” PLASMA’S
MHD EIGENPERTURBATIONS IN THE INNER EARTH’S
MAGNETOSPHERE**

A. S. Parnowski and O. K. Cheremnykh

A spectrum of MHD eigenperturbations of magnetospheric plasma is analysed. Toroidal Alfvén and ionosonic modes are shown to be main eigenmodes for a system with “rigid” boundary conditions on the ionosphere in the case of low pressure. As the pressure increases, poloidal Alfvén modes are generated in the magnetospheric plasma. Certain relations between the value of the pressure and its profile make them unstable. In this case one can refer to them as to unstable ballooning modes. The boundary conditions strongly affect the spectrum of the eigenperturbations in the magnetospheric plasma.

УДК 550.388.2

В. Г. Безродний, О. В. Буданов, А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

Электромагнитное окружение Земли

в СНЧ-диапазоне

Подаются результаты спостережень магнітної складової ННЧ-полів, виконаних на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» з травня 2001 р. по січень 2003 р. Аналізуються сезонні залежності поляризаційних характеристик електромагнітних шумів, збуджуваних світовою грозовою активністю на частотах шуманівських резонансів. Приводиться відтворений за цими характеристиками добовий хід активностей трьох основних світових грозових центрів для різних місяців року. Показано зв'язок вузької спектральної лінії 60 Гц, що надійно реєструється на станції, з випромінюванням силових електромереж північноамериканського континенту.

ВВЕДЕНИЕ

Стационарное электромагнитное окружение Земли в диапазоне сверхнизких частот 3—300Гц формируют преимущественно сигналы и шумы, возбуждаемые приземными источниками. Основным естественным приземным источником СНЧ-полей является, без сомнения, мировая грозовая активность, распределенная по поверхности земного шара. В качестве наиболее вероятных приземных источников СНЧ-излучения антропогенного происхождения следует, на наш взгляд, рассматривать мощные силовые электрические сети промышленно развитых регионов мира. Начиная с мая 2001г., систематические наблюдения в СНЧ диапазоне осуществляются сотрудниками Радиоастрономического института НАН Украины (РИНАНУ) на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» ($65^{\circ}14' S$, $64^{\circ}15' W$), расположенной на островах Аргентинского архипелага вблизи от Антарктического полуострова. Бесспорным удобством и преимуществом СНЧ наблюдений в Антарктике является полное отсутствие здесь местных грозовых и индустриальных помех, существенно затрудняющих и даже делающих подчас невозможными подобные наблюдения в других регионах мира. Измерения обеспечиваются Украинским антарктическим центром и выполняются в рамках Государственной программы антарктических исследований по научному направлению «Изучение физики верхней ат-

мосферы и ближнего космоса». Основная направленность представленных ниже исследований состояла в изучении поляризационных свойств глобальных шумановских резонансов (ШР) в полости Земля—ионосфера и поиске узкополосных спектральных составляющих электромагнитных СНЧ-полей техногенного происхождения.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На протяжении 2001 г. регистрация магнитного компонента СНЧ-сигналов осуществлялась при помощи приемного комплекса РИНАНУ, начиная с марта 2002 г. и по настоящее время — с использованием широкополосного (0.03—300 Гц) магнитометрического комплекса Lemi112A, разработанного и изготовленного Львовским центром Института космических исследований НАНУ—НКАУ. Комплекс состоит из двух идентичных магнитных датчиков индукционного типа, блока управления и регистрирующего компьютера. В состав комплекса входит также аппаратура для измерения горизонтальных составляющих электрического поля, которая в данной работе рассматривается не будет. Для уменьшения возможных паразитных наводок комплекс размещен в ОНЧ-павильоне, расположенном на удалении около полукилометра от основных зданий станции. Датчики вынесены за пределы павильона на несколько десятков метров и ориен-

тированы взаимно ортогонально в направлениях север—юг и восток—запад. Сигналы с них регистрируются 16-ти разрядным АЦП с темпом оцифровки 500 Гц. Временная синхронизация обеспечивается GPS-системой, встроенной в блок управления. Комплекс работает непрерывно в мониторинговом режиме. Непосредственно на станции осуществляется предварительная обработка сигналов. Как сами сигналы, так и результаты их обработки, считаются раз в неделю в цифровой архив на CD-Rom.

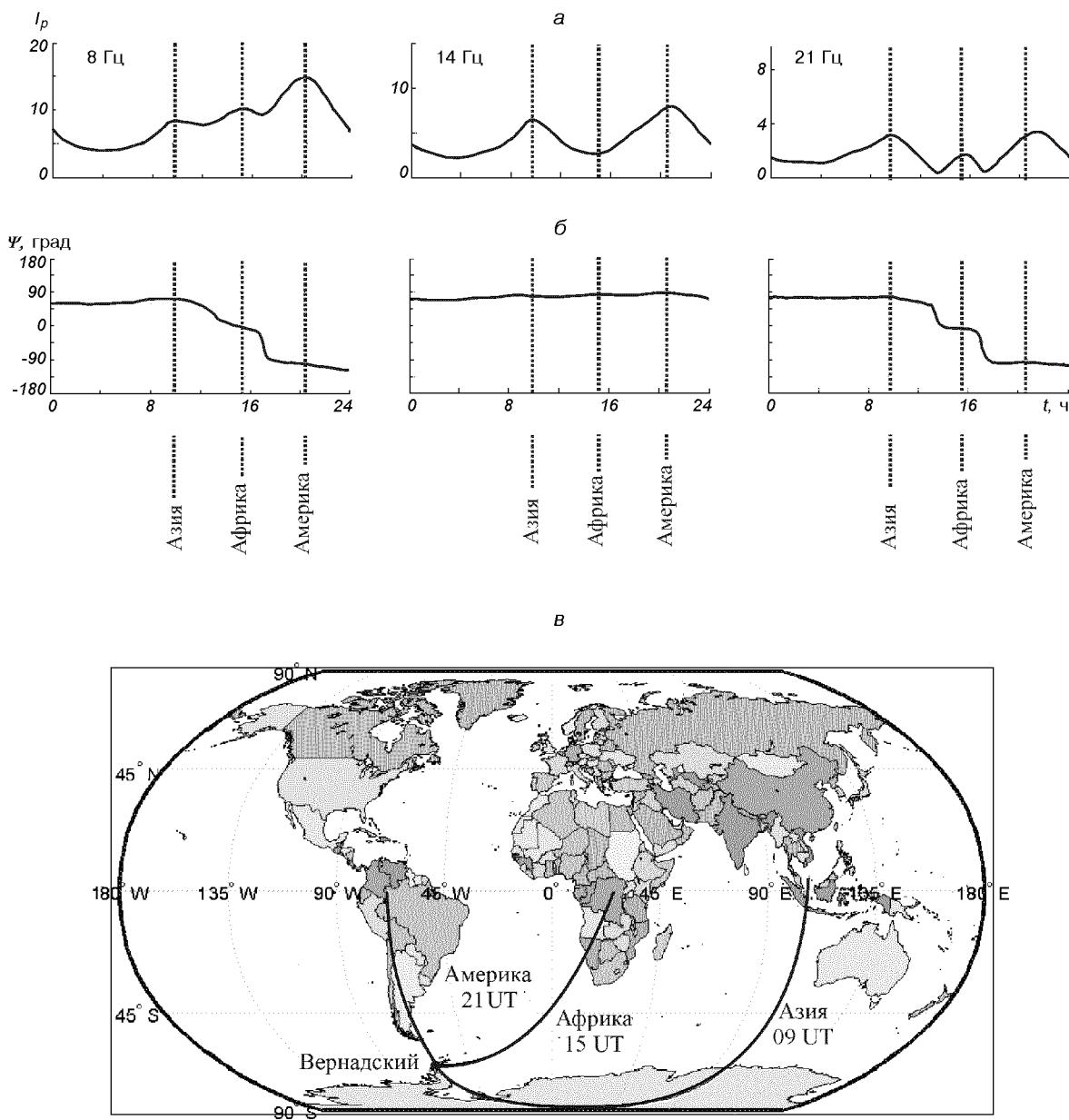


Рис. 1. Суточная зависимость $I_p(t)$ для трех мод ШР, октябрь 2002 г. (а); суточная зависимость $\Psi(t)$, октябрь 2002 г. (б); карта расположения мировых грозовых центров (в).

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Достаточно хорошо известно [1], что электромагнитные шумановские СНЧ-резонансы (полоса частот условно 6—60 Гц) возбуждаются в глобальном резонаторе Земля—ионосфера излучением вертикальных молниевых разрядов. Главными источниками таких разрядов являются три основных центра мировой грозовой активности, расположенные в экваториальных районах соответственно Южной

Америки, Африки и Юго-Восточной Азии. Наблюдение за шумановскими резонансами на длительных временных интервалах позволяет судить о глобальных изменениях состояний ионосферы и земного климата. В проведенных нами регистрациях устойчиво наблюдалось в течение суток до шести указанных шумановских максимумов. Для первых трех из них (соответственно 8, 14 и 20 Гц) осуществлялась поляризационная обработка. В ходе такой обработки для горизонтального магнитного компонента СНЧ-поля каждой из перечисленных резонансных частот определялись суточные вариации параметров Стокса I , Q , U , V , а также производных от них поляризационных характеристик СНЧ-шума: интенсивности поляризованной составляющей I_p , степени поляризации P , коэффициента эллиптичности r , позиционного угла эллипса поляризации Ψ . Расчеты выполнялись с использованием известных формул [2]. Для определения среднего за месяц суточного хода характеристик I_p , P , r , Ψ использовались параметры Стокса, дополнительно усредненные по соответствующему месячному ансамблю суточных реализаций. Рассмотрим, как выглядят такие усредненные зависимости.

На рис. 1. *a*, *б* представлены достаточно типичные, соответствующие октябрю 2002 г., суточные зависимости от мирового времени UT интенсивности поляризованной составляющей I_p и позиционного угла Ψ эллипса поляризации для магнитных полей первых трех шумановских мод. В интенсивностях поляризованного компонента первой и третьей мод обращают на себя внимание три максимума, положения которых на временной оси совпадают с интервалами максимальной активности основных мировых грозовых центров: азиатского (вблизи 09:00UT), африканского (около 15:00 UT) и американского (вблизи 21:00 UT). Месторасположение этих центров иллюстрирует карта, приведенная на рис. 1, *в*. При пересчете UT в местное время указанные максимумы активности для каждого из центров приходятся на предзаходные периоды (17–18LT), что хорошо согласуется с известными литературными данными на этот счет. Для второй моды шумановских резонансов «африканский максимум» отсутствует в силу того, что дистанция от «Вернадского» до африканского центра близка к условиям формирования минимума интерференционного поля соответствующей частоты. На кривых для позиционного угла эллипса поляризации первой и третьей мод отчетливо прослеживаются три характерных «ступеньки». Восстановленные по их положениям азимуты на источники оказываются близки к ожидаемым направлениям

на азиатский, африканский и американский центры мировой грозовой активности соответственно.

На рис. 2 представлены суточные зависимости коэффициентов эллиптичности полей двух первых резонансных мод для различных месяцев 2001 г. и 2002 г. Видно, что кривые для одноименных месяцев двух лет достаточно хорошо совпадают (а в отдельных случаях — вплоть до мелких деталей), указывая тем самым на некие устойчивые зависимости. Такие зависимости проявляются в следующем:

- для первой моды во все сезоны года значения коэффициента эллиптичности на протяжении суток остаются достаточно большими по величине и положительными, что в использованных нами определениях соответствует вращению магнитной составляющей СНЧ-поля в горизонтальной плоскости по часовой стрелке;
- для второй моды в период после осеннего равноденствия (сентябрь—ноябрь) коэффициент эллиптичности ведет себя таким же образом, как и у первой моды, т. е. сохраняет положительный знак в течение всех суток; вблизи же летнего солнцестояния (май—август) его знак, а значит направление вращения вектора магнитного поля, изменяется на протяжении дня несколько раз; абсолютные значения коэффициента эллиптичности второй моды всегда ниже, чем у первой;
- для третьей моды (соответствующие кривые на рисунке не приведены) коэффициент эллиптичности во все сезоны года оказывается малым по абсолютной величине и знакопеременным в течение дня со среднесуточным значением, близким к нулю.

В настоящее время нами завершается решение теоретической задачи о поляризации полей шумановских резонансов в гиротропном резонаторе Земля—ионосфера. В процессе решения уже объяснено положительное направление вращения магнитной составляющей первой моды, наблюдаемое нами в Антарктике, и предсказано изменение этого направления на противоположное при перемещении наблюдателя в Северное полушарие. Предсказано, а затем зарегистрировано экспериментально, связанное с гиротропией отрицательное систематическое смещение азимутов источников излучения, восстановленных из поляризационных измерений, по отношению к их истинным значениям. В соответствии с экспериментальными данными 2002 г. величины таких смещений составляют 10–15° для первой моды и быстро уменьшаются с ростом номера резонансного максимума. Восстановлены средние за каждый месяц наблюдений суточные ходы суммарной мировой грозовой активности (рис. 3, *б*) и активностей каждого из грозовых центров, взя-

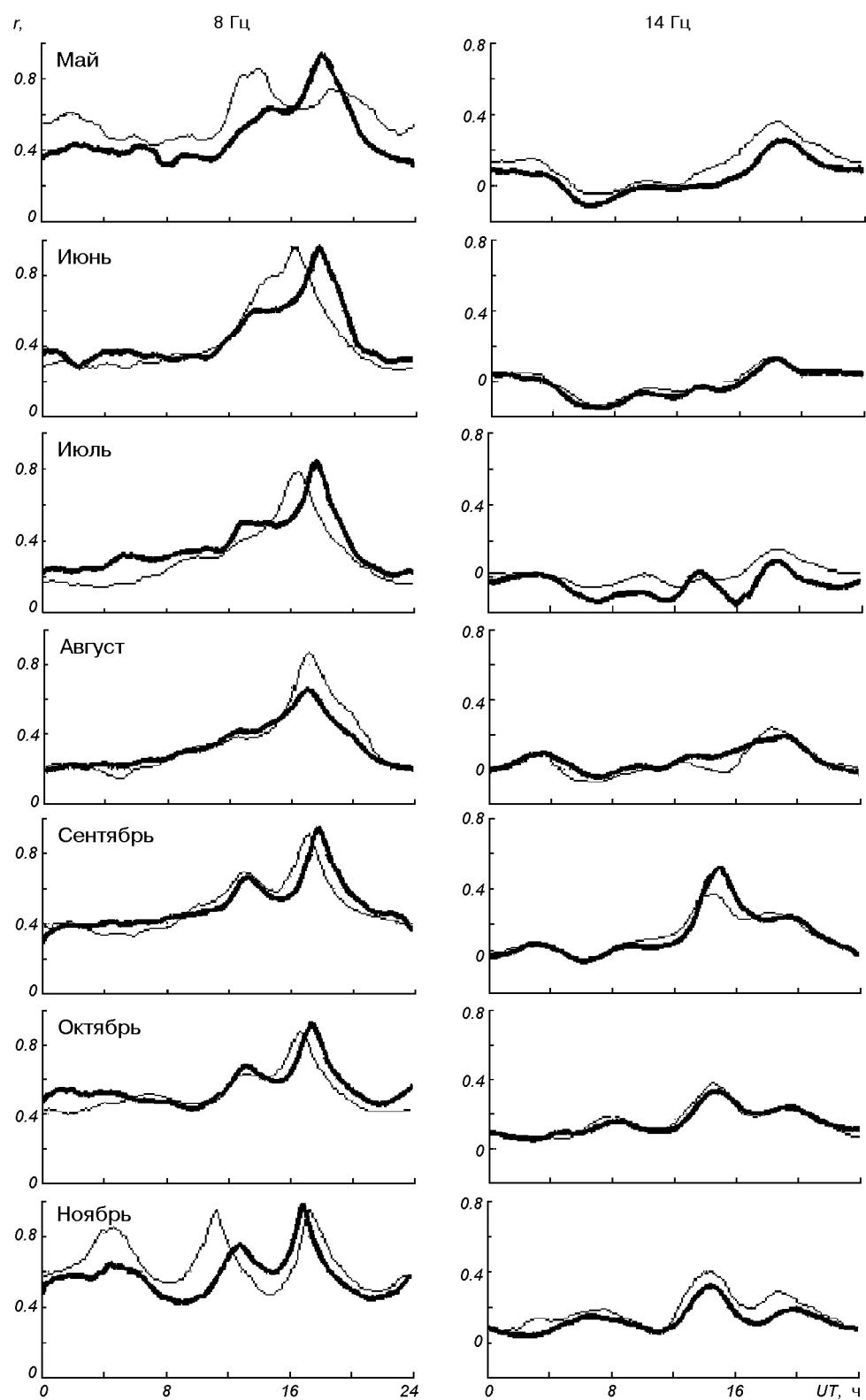


Рис. 2. Суточные зависимости $r(t)$ для двух мод ШР в период май—ноябрь 2001 г. (тонкая линия) и 2002 г. (жирная линия)

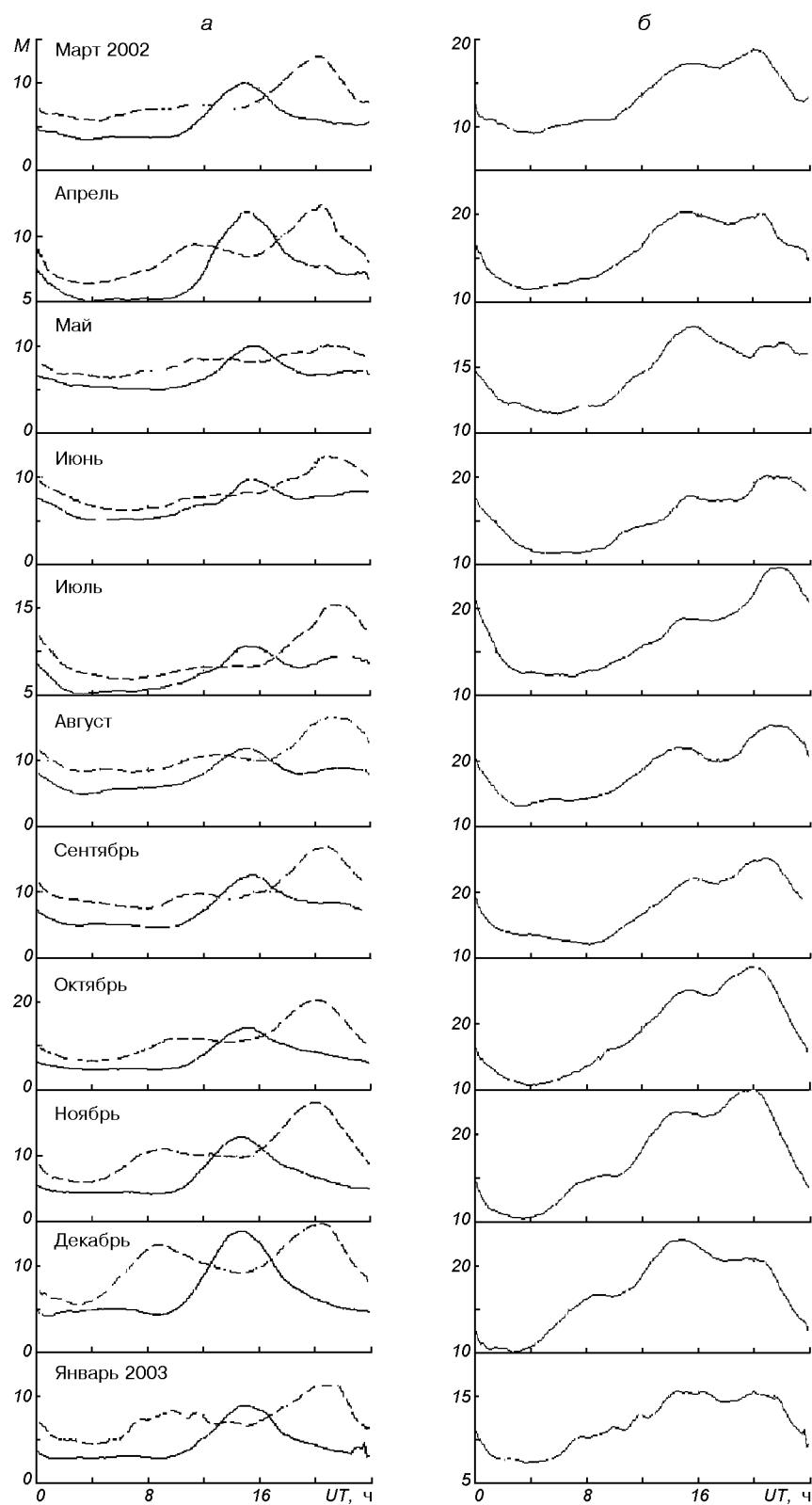


Рис. 3. Восстановленные за период март 2002 г.—январь 2003 г. суточные ходы активности: *а* — африканского (сплошная кривая), восточно-азиатского и южно-американского (штриховая линия) грозовых центров; *б* — интегральной мировой грозовой активности

тых в отдельности (рис. 3, а). Здесь по горизонтальной оси отложено мировое время, сплошная линия соответствует африканскому грозовому центру, штриховая — совместному действию азиатского и американского центров. Перечисленные результаты наглядно демонстрируют возможность использования данных непрерывных поляризационных наблюдений шумановских резонансов для осуществления однопунктового дистанционного мониторинга из Антарктики уровней активности мировых грозовых центров и характеристик ионосферной границы резонатора Земля—ионосфера.

РЕГИСТРАЦИЯ СНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ПРИРОДЫ

Как уже указывалось, кроме естественных источников, к возбуждению полости Земля—ионосфера в диапазоне СНЧ могут приводить также мощные излучающие системы техногенного происхождения. К последним прежде всего относятся силовые электрические сети промышленно развитых регионов Европы и США, соответственно 50 Гц и 60 Гц. Помехи, создаваемые на Украинской антарктической станции работой местной генераторной установки 50 Гц, исключают возможность регистрации здесь излучения европейской электросети. Поэтому поиск спектральных линий проводился нами только для частот вблизи 60 Гц. Соответствующие измерения выполнялись на протяжении 2002 г. При расчетах экспериментальных спектров использовалось высокое спектральное разрешение (0.007 Гц) и большие времена накопления (2 ч). В ходе таких измерений нами была надежно обнаружена узкополосная стабильная по частоте спектральная линия 60 Гц. Эта линия устойчиво регистрировалась в течение всего годичного цикла наблюдений. В пользу ее связи с силовыми сетями США свидетельствуют следующие аргументы.

На рис. 4, а представлена типичная суточная зависимость азимута на источник излучения, восстановленная из экспериментально полученных значений позиционного угла. Видно, что кривая попадает точно внутрь полосы граничных направлений на территорию США. Амплитуда линии имеет устойчивый суточный ход (рис. 4, б). В ее спектре, построенном за временной период с марта по октябрь 2002 г. (рис. 4, в), кроме суточной и полусуточной, имеются также недельная и полуночная гармоники. Наличие у амплитуды исследуемой линии таких спектральных составляющих связано, по всей видимости, с характерными для силовых сетей США регулярными циклами измене-

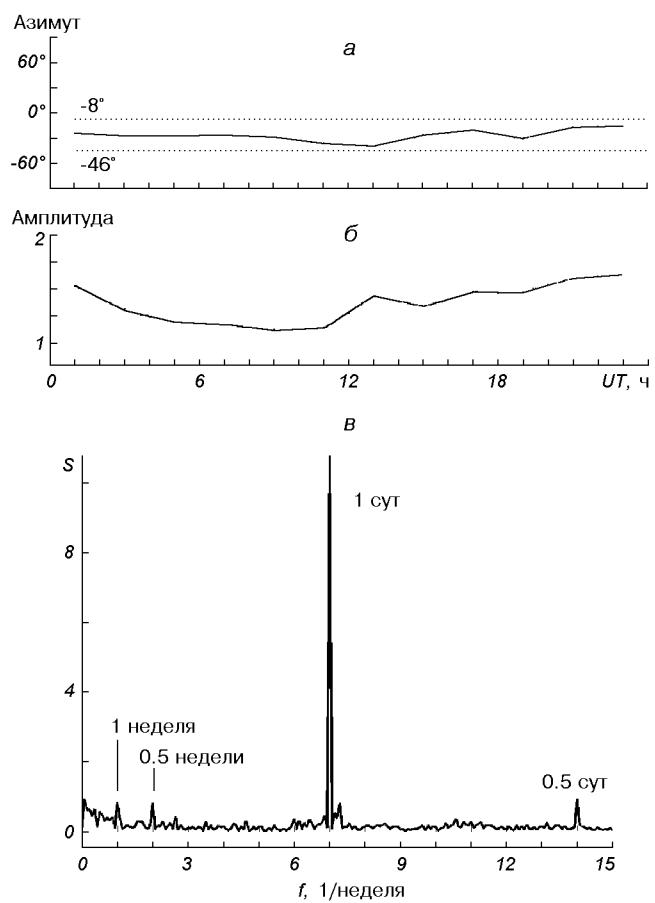


Рис. 4. Усредненная суточная зависимость азимута на источник линии 60 Гц, июнь 2002 г. (а) (азимуты -8° и -46° соответствуют восточному и западному побережью США); усредненная суточная зависимость амплитуды линии 60 Гц, июнь 2002 г. (б); спектр амплитуды линии 60 Гц за период с марта по октябрь 2002 г. (в)

ний мощности энергопотребления.

Для исключения возможности генерации линии 60 Гц непосредственно на УАС, была проведена серия экспериментов по отключению потенциальных источников ее возбуждения, в ходе которых линия продолжала неизменно фиксироваться. Кроме того, линия на том же уровне интенсивности и с тем же азимутальным углом прихода наблюдалась и в выездном эксперименте на антарктический материк, когда магнитометр был вывезен на удаление 12 км от станции.

Изложенные доводы дают основание утверждать, что в проведенном нами на станции «Академик Вернадский» цикле поляризационных СНЧ-измерений 2002 г. была впервые зарегистрирована в Антарктике линия силовой электросети США и продемонстрирована возможность использования ре-

зультатов таких измерений для осуществления оперативного мониторинга степени проникновения энерговыделений силовой сети США на Антарктический континент.

Работа выполнена при поддержке НТЦУ, проект № Р-072. Авторы глубоко признательны руководству Украинского антарктического центра за возможность проведения измерений на Украинской антарктической станции.

1. Блиох П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля—ионосфера. — Киев: Наук. думка, 1977.—199 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М: Наука, 1970.—855 с.

ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT OF THE EARTH AT ELF

V. G. Bezrodny, O. V. Budanov, A. V. Koloskov,
and Yu. M. Yampolski

Some results of observations of the ELF field's magnetic component at the Ukrainian Antarctic Station «Akademic Vernadsky» are presented which cover a period of May 2001 through January 2003. We analysed seasonal dependences of polarization properties of the electromagnetic noise excited by global thunderstorm activity at the Schumann resonance frequencies. The dependences were used to recover diurnal variations of the activity at three major world thunderstorm centres over different seasons. The relation between the narrow spectral line at 60 Hz which is reliably detectable at the Vernadsky Station and the radiation from electric power networks of the North-American continent is justified.

УДК 550.388.2

О. Є. Готинян¹, В. М. Івченко^{1,2}, Ю. Г. Рапопорт^{1,2}

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Зв'язок характеристик одинарного літосферного джерела акусто-гравітаційних хвиль та іоносферного відгуку

Розроблено тривимірну чисельну модель збудження акусто-гравітаційних хвиль (АГХ) від наземного теплового джерела. Отриманий лінійний відгук іоносферної плазми F-області. Одержано залежність іоносферного відгуку від періоду АГХ. Досліджена залежність іоносферного відгуку від напрямку геомагнітного поля. Амплітуда відносної зміни електронної концентрації в іоносферній плазмі відповідає АГХ з характеристиками періодами близько 1 год. Такі періоди і значення відносної зміни електронної концентрації збігаються за порядком величини з даними спостережень перед землетрусами. Типові модельні значення збурення електронної концентрації у використаній моделі ідеальної атмосфери становить декілька десятків процентів на висотах F-області.

ВСТУП

Інтерес до проблеми літосферно-іоносферної взаємодії значно виріс протягом останніх років. Це пояснюється значною кількістю спостережень іоносферних збурень під час підготовки землетрусів, таких як спостереження варіацій світіння нічного неба у спектральних лініях кисню $\lambda\lambda 557.7$ і 630 нм [21, 8, 7] на висотах приблизно 100 і 270 км, відповідно, варіації загального вмісту електронів (total electron content, TEC) [20], інфрачервоне випромінювання від джерел сейсмічної активності, зареєстроване з супутників, яке може бути викликане АГХ [3, 22], рухомими іоносферними збуреннями (traveling ionospheric disturbances, TID) [14] та ін. Всі ці явища можуть бути викликані АГХ.

Обмін енергією в системі літосфера-атмосфера-іоносфера-магнітосфера (ЛАІМ) перед сильними землетрусами може здійснюватися багатьма каналами взаємодії: електромагнітним [12, 19], нагрівним фотохімічним [11] і каналом АГХ [4, 5, 9, 10]. В даній роботі обговорюється останній з вказаних каналів.

Основна мета запропонованої моделі АГХ каналу сейсмо-іоносферної взаємодії — це послідовний розгляд збудження АГХ та переносу ними енергії «знизу

© О. Є. Готинян, В. М. Івченко, Ю. Г. Рапопорт, 2003

вгору» в системі літосфера-атмосфера-іоносфера.

Двовимірна модель збудження АГХ літосферними газами внаслідок парникового ефекту була запропонована спочатку в роботах [4, 9]. У представлений роботі наведено результати тривимірної моделі збудження АГХ одинарним тепловим джерелом атмосферних газів і розглянуто в лінійному наближенні вплив АГХ літосферного походження на F-область іоносфери у похилому магнітному полі.

МОДЕЛЬ ЛІТОСФЕРНОГО ГАЗОВОГО ДЖЕРЕЛА АГХ

Система рівнянь гідродинаміки, що описує АГХ з джерелами тепла, маси і сили, має наступний вигляд [13]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= -\nabla p + \rho g + \rho \mathbf{F}_v, \\ \frac{dp}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} &= q, \\ \frac{dp}{dt} + \mathbf{v} \nabla p &= c^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \rho \right) + A\rho, \end{aligned} \quad (1)$$

де ρ , \mathbf{v} , p — відповідно густота, швидкість і тиск нейтральної атмосфери, g прискорення вільного

падіння, $d/dt \equiv \partial/\partial t + \mathbf{v}\nabla$, γ — адіабатична стала, \mathbf{e}_z — одиничний вертикальний вектор, $F_z = F_z \mathbf{e}_z$ — силова функція, $q(\mathbf{r}, t)$ і $A(\mathbf{r}, t)$ — густина джерела маси і тепла, що визначається ступенем дегазації літосфери. Для випадку збудження АГХ літосферними парниковими газами [4], вихід яких на поверхню землі промодульований сейсмографітаційними пульсаціями з характерними періодами від десятків хвилин до годин [5], оцінки показують, що головний внесок в утворення АГХ робить джерело тепла. В роботі [4] система (1) була розв'язана для гравітаційних хвиль — довгоперіодичної гілки АГХ — без розрахунку реактивних мод, тобто таких, що збуджуються на неоднорідностях, але не розповсюджуються в атмосфері [13], і для джерела у вигляді «сходинки».

Модель збудження АГХ з отриманням ефективних граничних умов на земній поверхні була запропонована в роботі [9]. Ефективні граничні умови на рівні землі отримані на основі розгляду тришарової моделі, включаючи два напівнескінченних шари землі і атмосфери, і тонкого приповерхневого шару атмосфери, що містить парникові гази і розташований між двома вказаними напівнескінченними шарами атмосфери і літосфери. В горизонтальній площині область, де розраховується поле АГХ, обмежена уявними бічними стінками, на яких ставляться періодичні граничні умови. В результаті неперервний спектр АГХ в горизонтальній площині замінюється дискретним, і використовується дискретне перетворення Фур'є. На висотах F-шару іоносфери (які нас цікавлять тут) пакет стаціонарних АГХ від літосферного джерела ще не доходить до уявних бічних стінок, які ставляться на відстанях, достатньо великих для цього, і таких, що значно перевищують розміри джерела. Це забезпечує відсутність фіктивного «відбиття» АГХ від уявних бічних стінок. Верхня гранична умова — це умова випромінювання АГХ. Просторовий розподіл двовимірного наземного джерела має вигляд [4, 9]

$$v_z^{\text{src}}(x) \approx \Delta z A \approx \frac{\Delta z}{gH} \frac{\omega k_b \Delta T}{m_n} \operatorname{ch}^{-2} \left(\frac{x^2}{l_x^2} + \frac{y^2}{l_y^2} \right), \quad (2)$$

де ΔT (≈ 3 К) амплітуда температурної аномалії, викликаної парниковими газами, $l_{x,y}$ (≈ 100 км) — характерний розмір джерела по координатах x та y , Δz (≈ 3 м) — товщина приземного шару атмосфери, що містить підвищену кількість парниковых газів (наприклад CO_2), ω і $T = 2\pi/\omega$ — частота і період літосферного газового джерела (еквівалентна частота модуляції потоку літосферних газів), k_b , g і H — стала Больцмана, прискорення вільного падіння і висота однорідної атмосфери відповідно,

m_n — середня маса нейтральних часток атмосфери.

Важливість так званих реактивних (які не розповсюджуються) мод пов'язана з властивостями АГХ, що видно з закону дисперсії для АГХ [13]:

$$\omega^2 = \frac{c^2}{2} \left(k_\perp^2 + k'_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \pm \pm \sqrt{\frac{c^4}{4} \left(k_\perp^2 + k'_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right)^2 - (\gamma - 1) g^2 k_\perp^2}, \quad (3)$$

чи

$$k'_z = \pm \sqrt{k_\perp^2 \left(\frac{\omega_b^2}{\omega^2} - 1 \right) + \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{1}{4H^2}}, \quad (4)$$

k — хвильовий вектор АГХ, $k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2$, k'_z — дійсна частина вертикальної складової хвильового вектора, $k_z = i/(2H) + k'_z$, ω — частота АГХ які вважаються монохроматичними. Знак «+» в дисперсійному співвідношенні відповідає акустичній гілці, а знак «-» — внутрішнім гравітаційним хвильам.

Як видно з (4), для мод, що задовольняють умову

$$4H^2 k_{\perp m}^2 < \left(1 - \frac{4H^2 \omega^2}{c^2} \right) / \left(\frac{\omega_b^2}{\omega^2} - 1 \right), \quad (5)$$

$k_{\perp m}$ є чисто уявною величиною, і моди, що відповідають такому хвильовому числу, є реактивними. Такі моди не можуть розповсюджуватися в атмосфері, але, як показано в роботах [9, 10], можуть суттєво впливати на амплітуди тих хвиль, що розповсюджуються, зокрема, на поле величину швидкості АГХ в іоносфері. Тому врахування таких «реактивних» мод проводиться в даній роботі.

ВПЛИВ АГХ НА ІОНОСФЕРУ

Відповідно до дрейфового наближення [16, 21], іонна (електронна) концентрація N , за умов нейтральності і

$$\frac{m_e v_{\text{en}}}{eH_0} \ll \frac{m_i v_{\text{in}}}{eH_0} \ll 1 \mid eN\mathbf{u}_i \mid \ll \frac{m_e v_{\text{en}}}{m_i v_{\text{in}}} \mid \mathbf{j}^{||} \mid,$$

описується рівнянням

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla(N\mathbf{u}_i) + Q - L. \quad (6)$$

Тут

$$\mathbf{u}_i \approx \mathbf{u}_i^{||} = \mathbf{v}^{||} - \frac{D_a}{2k_B T_i} [\nabla^{||}(p_e + p_i) - N m_i \mathbf{g}^{||}], \quad (7)$$

де m_e , m_i — електронна і іонна маси, v_{en} , v_{in} — частоти зіткнень електронів та іонів з нейтралами,

u_i — швидкість дрейфу іонів, індекс «||» означає проекцію на напрямок геомагнітного поля, p_e , p_i — електронний та іонний тиск, відповідно, j — плазмовий струм, D_a — коефіцієнт амбіполярної дифузії, T_i — температура іонів, k_B — стала Больцмана, N_0 — рівноважна концентрація заряджених частинок в плазмі, Q — коефіцієнт утворення електронів.

Коефіцієнт втрат електронів задається виразом

$$L = \alpha N_N (N - N_0). \quad (8)$$

Для випадку ізотермічних електронів і іонів коефіцієнт амбіполярної дифузії дорівнює

$$D_a = 2k_B T_i / (m_i v_{in} + m_e v_{en}) \approx 2k_B T_i / m_i v_{in},$$

$$v_{in, en} = q_{in, en} N_N, \quad (9)$$

де N_N — концентрація нейтральних частинок, коефіцієнти α і $q_{in, en}$ описані в роботах [1, 2].

Лінеаризація (6)–(9) дає (для нічних умов, коли $Q = 0$)

$$\tilde{N}_{emn} = N_{e0} \frac{G}{D},$$

$$G = \left(i\mathbf{K}_H - e_{Hz} \frac{1}{L_{eff}} \right) v_H, \quad (10)$$

$$D = D_t + D_a \mathbf{K}_H^2 + i\mathbf{K}_H \left[e_{Hz} \frac{\partial D_a}{\partial z} + \frac{g \cos \theta}{v_{in}} \right] + \alpha.$$

Тут $\tilde{N}_e = N - N_0$ і $N_{e0} = N_0$ — відповідно збурене і рівноважне значення електронної концентрації, v_H — швидкість АГХ вздовж геомагнітного поля, $D_t = i\omega$, $D_z = -ik_{zmn}$ (припускається залежність від часу $\propto e^{i\omega t}$), e_H — одиничний вектор напрямку магнітного поля Землі,

$$e_{Hz} = \cos \theta, \quad \mathbf{K}_H = \mathbf{e}_H \cdot \mathbf{K},$$

$$\mathbf{K} = (k_{xm}, k_{yn}, k_{zmn}), \quad L_{\phi} = \frac{1}{N_{e0}} \frac{\partial N_{e0}}{\partial z},$$

α — коефіцієнт рекомбінації. Для типових параметрів F-області іоносфери (див. [15]) маємо

$$D_a \mathbf{K}_H^2 \gg \mathbf{K}_H \left[e_{Hz} \frac{\partial D_a}{\partial z} + \frac{g \cos \theta}{v_{in}} \right]. \quad (11)$$

У цьому випадку третє рівняння системи (10) можна спростити:

$$D = D_t + D_a \mathbf{K}_H^2 + \alpha, \quad (12)$$

що відповідає виразу з роботи [15].

Використовуючи (10) і обернене перетворення Фур'є, отримуємо

$$\frac{N'_e}{N_{e0}} (x_i, y_j, z) = \\ = e^{z/(2H)} \sum_{m=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{n=-N_y/2}^{N_y/2} [\tilde{N}_{emn} / N_{e0}] \cdot e^{-ik_{xm} x_i - ik_{yn} y_j - ik_{zmn} z},$$

де $x_i = L_x i / N_x$, $y_j = L_y j / N_y$, $i = -N_x/2 - 1, -N_x/2, \dots, N_x/2$, $j = -N_y/2 - 1, -N_y/2, \dots, N_y/2$ — цілі числа.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ

На основі чисельного моделювання отримані значення поля АГХ для одинарних літосферних джерел різних форм і розмірів з різними періодами. Також одержано відповідний іоносферний відгук у F-області на проходження такої АГХ. Результати для симетричного джерела (рис. 1) наведено на рис. 2. Як видно, значення горизонтальної швидкості поля АГХ на висоті 250 км для симетричного літосферного джерела розміром 100 км на 100 км з теплововою аномалією 3 К і періодом 60 хв становить 8 м/с (рис. 2, a), а відповідний іоносферний відгук досягає 8 % відносного збурення електронної концентрації (рис. 2, б).

Для витягнутого джерела з характерними розмірами 100 км на 300 км (рис. 3) для періоду АГХ 60 хв горизонтальна швидкість АГХ досягає помітного значення 21 м/с (рис. 4, a), а відповідне збурення електронної концентрації на висоті 250 км становить кілька десятків процентів (рис. 4, б).

Дрейф плазми вздовж геомагнітного поля у F-області іоносфери може викликати значну асиметрію

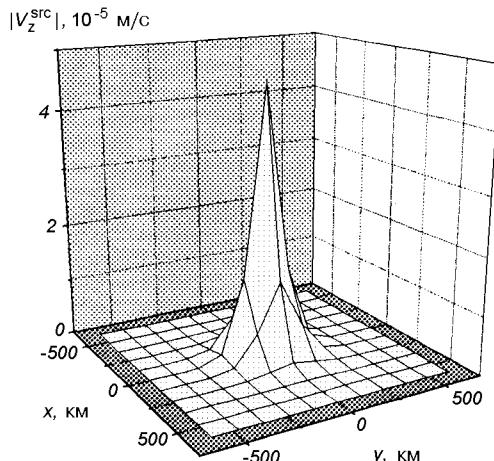


Рис. 1. Просторовий приповерхневий розподіл вертикальної складової швидкості АГХ для симетричного джерела з характерним розміром 100 км і теплововою аномалією в 3 К. Період АГХ становить 50 хв

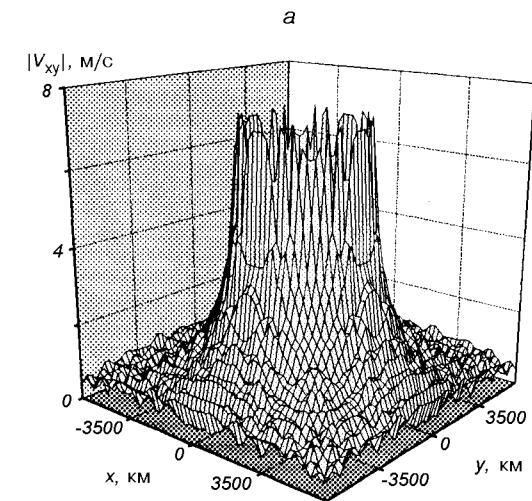
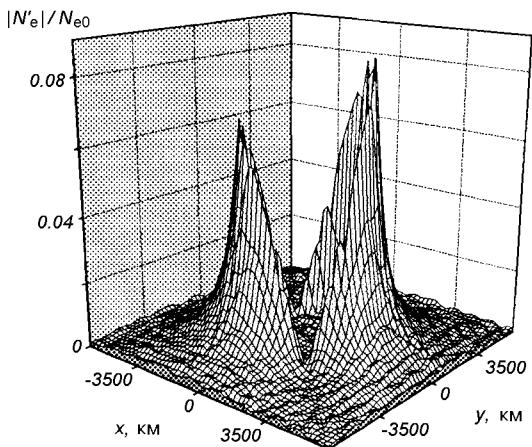
*б*

Рис. 2. Просторовий розподіл горизонтальної складової швидкості АГХ (а) і відносного збурення електронної концентрації (б) для симетричного джерела з параметрами, що відповідають рис. 1; висота становить 250 км, кути нахилу магнітного поля $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 45^\circ$.

в просторовому розподілі зміни електронної концентрації внаслідок впливу АГХ. Типові значення відносної зміни електронної концентрації (кілька десятків відсотків) і просторових масштабів ($\sim 10^3$ км) кількісно збігається з результатами спостережень у F-області іоносфери перед землетруса-ми [4–6, 18, 17].

Результати дослідження залежності просторового максимуму іоносферного відгуку на висоті 250 км для витягнутого одинарного джерела АГХ від кутів напрямку геомагнітного поля наведено на рис. 5. Асиметрія і залежності N'_e/N_{e0} від θ (рис. 5)

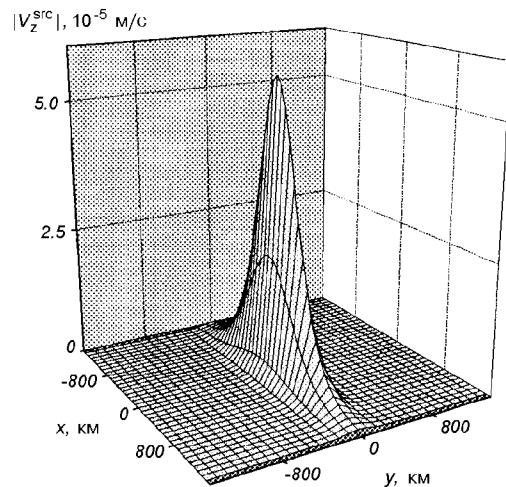


Рис. 3. Просторовий приповерхневий розподіл вертикальної складової швидкості АГХ для витягнутого джерела з характерними розмірами 100 км на 300 км і тепловою аномалією в ЗК.Період АГХ становить 70 хв.

викликана у першу чергу наявністю члена $D_a K_H^2$ в знаменнику D у правій частині формул (11). Цей член пов'язаний з дивергенцією іонного потоку у напрямку геомагнітного поля, викликаного амбі-полярною дифузією при наявності АГХ. Максимум N'_e/N_{e0} досягається при $\theta \approx 80^\circ$ і $\varphi = 90^\circ$ для літосферного джерела, витягнутого в напрямку X (це означає, що випромінювання АГХ головним чином відбувається в напрямку, перпендикулярному до осі «антени АГХ»).

На рис. 6 наведена залежність максимальної відносної зміни електронної концентрації N_e^{\max}/N_{e0} від періоду АГХ для фіксованої висоти 250 км. Високочастотні «збурення» в залежності, показаної на рис. 6, відповідають числовим похибкам, що виникають внаслідок заміни інтегралу Фур'є на ряд Фур'є. Наявність максимуму в залежності від частоти/періоду можна пояснити таким чином. Як видно з (10), якщо $\omega \rightarrow 0$ ($T \rightarrow \infty$), то $k_z \propto 1/\omega$. Через те що середовище при описуваних умовах є фактично нестискуваним, можна для будь-якої моди з номером m записати (для спрощення наводимо пояснення для двовимірного випадку)

$$\nu_{zm} k_{zm} + \nu_{xm} k_{xm} = 0. \quad (13)$$

Беручи до уваги (2), (12), легко бачити, що за таких умов $\nu_x \rightarrow \text{const}$, $\nu_z \rightarrow 0$, де $\nu_{x,z}$ — компоненти повної швидкості ВГВ. Це підтверджено числовими розрахунками. Відповідно до (10), (2), (13), можна одержати $N_e^{\max}/N_{e0} \sim \omega$, коли $\omega \rightarrow 0$. У той же самий час з виразів (2), (3)–(5) легко бачити, що $N_e^{\max}/N_{e0} \rightarrow 0$, якщо $\omega \rightarrow \infty$ ($T \rightarrow 0$). З цього

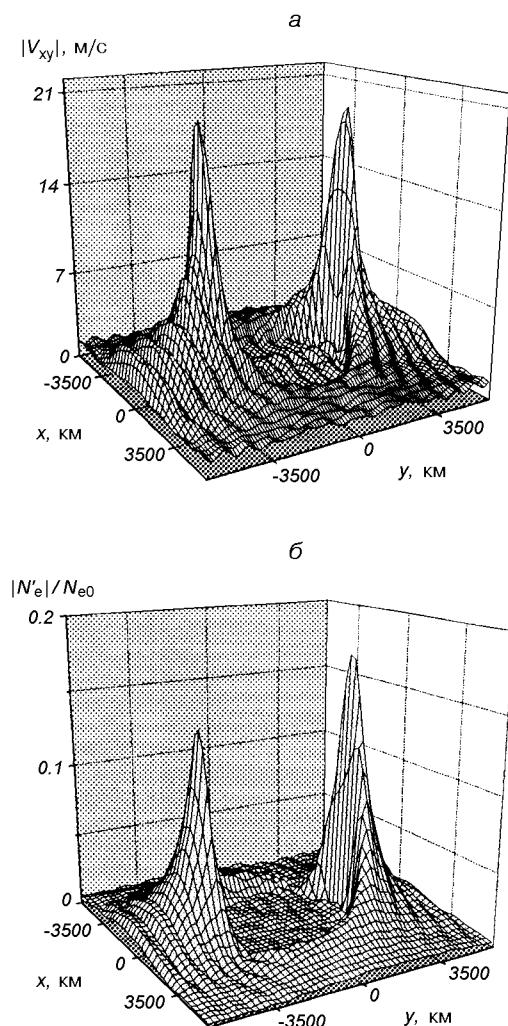


Рис. 4. Просторовий розподіл горизонтальної складової швидкості АГХ (а) і відносного збурення електронної концентрації (б) для витягнутого джерела з параметрами, що відповідають рис. 3; висота становить 250 км, кути нахилу магнітного поля $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 45^\circ$

випливає існування максимуму у залежності $[N_e^{\max}/N_{e0}](T)$. Цікаво, що максимум залежності відповідає періоду АГХ близько години (в залежності від просторових масштабів джерела), що досить близько до типових періодів змін електронної концентрації у F-області іоносфери над сейсмічно активними областями [17, 18].

ВИСНОВКИ

В роботі представлено тривимірну теоретичну модель збурення та розповсюдження АГХ і розгляну-

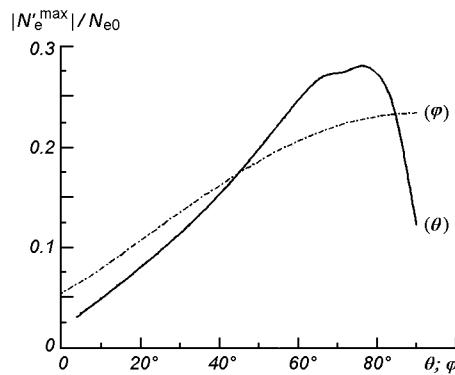


Рис. 5. Залежність максимуму просторового розподілу відносного збурення електронної концентрації від кутів нахилу магнітного поля для витягнутого джерела з параметрами, що відповідають рис. 3 на висоті 250 км

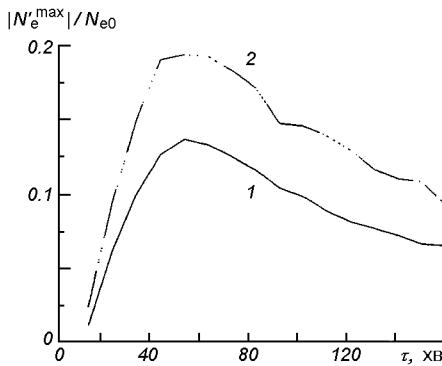


Рис. 6. Залежність максимуму просторового розподілу відносного збурення електронної концентрації від періоду АГХ для симетричного (1) і витягнутого (2) джерел з рис. 1 і 3 відповідно на висоті 250 км; кути нахилу магнітного поля $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 45^\circ$

то в лінійному наближенні вплив АГХ на F-область іоносфери.

На основі чисельного моделювання можна зробити наступні висновки.

1. Розвинута чисельна модель газового джерела АГХ для різних типів збурючої сили, перевірена чисельна збіжність (різниця порядку 1.5 % між 200 і 500 модами).

2. Величини амплітуд швидкостей АГХ мають значення порядку декількох десятків м/с, а відносна зміна електронної концентрації досягає декількох десятків відсотків на висоті 250 км для АГХ з періодом порядку 1 год і просторових масштабів декілька тисяч кілометрів. Ці характеристики іоносферного відгуку на АГХ кількісно відповідають результатам спостережень [4–6, 18, 17] для іоносферного відгуку у F-області на процеси підготовки сильного землетрусу ($M > 4.5–5$).

3. У похилому геомагнітному полі, іоносферний відгук має помітну просторову асиметрію. Досліджена залежність іоносферного відгуку від напрямку геомагнітного поля. Іоносферний відгук досягає максимуму для кута θ між геомагнітним полем і вертикальним напрямком близько 80° для джерела АГХ з розмірами 100 км на 300 км і періодом 40 хв.

4. Величина максимуму просторового розподілу іоносферного відгуку залежить від періоду АГХ. Для витягнутого джерела з характерними розмірами порядку 100 км на 300 км такий максимум відповідає періоду АГХ близько 50 хв.

Робота виконана при підтримці Національного космічного агентства України (контракт № 1-05.03 «Аналіз» (Аналіз—МКС)).

1. Генкин Л. Г., Ерухимов Л. М., Мясников Е. Н., Шварц М. М. К вопросу о образовании и плавучести изотермических ионосферных и хромосферных «пузырей» // Изв. Вузов. Радиофизика.—1987.—30.—С. 567—577.
2. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974.—255 с.
3. Горный В. И., Сальман А. Г., Тронин А. А., Шилин Б. В., Уходящее инфракрасное излучение Земли, как индикатор сейсмической активности // Докл. АН. СССР.—1988.—301, № 1.—С. 67—69.
4. Гохберг М. Б., Некрасов А. К., Шалимов С. Л. О влиянии нестабильного выхода парниковых газов в сейсмически активных регионах на ионосферу // Физика Земли.—1996.—№ 8.—С. 52—55.
5. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журн. наук о Земле.—2000.—2, № 1.—С. 95—108.
6. Попов К. В., Липеровский В. А., Алимов О. А. Модификация спектра вариаций плотности ночных F2 слоя ионосфера во время подготовки землетрясений // Физика Земли.—1996.—№ 1.—С. 93—96.
7. Торопчелідзе Т. І. Аналіз проблем астрономии с использованием излучения верхней атмосферы. — Тбіліси: Мецніереба, 1991.—114 с.
8. Gladishev V. A., Fishkova L. M. Optical research of seismoactivity effects of the ionosphere // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction / Eds M. Hayakawa, Y. Fujinawa. — Tokyo: TERRAPUB, 1994.—P. 375—380.
9. Gotyanan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G. Model of the internal gravity waves excited by lithospheric greenhouse effect gases // Космічна наука і технологія. Додаток.—2001.—7, № 2.—С. 26—33.
10. Gotyanan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G., Parrot M. Ionospheric disturbances excited by the lithospheric gas source of acoustic gravity waves before earthquakes // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 7.—С. 89—105.
11. Grimalskiy V. V., Hayakawa M., Ivchenko V. N., et al. Penetration of electrostatic field from the lithosphere into the ionosphere and its effect on the D-region before earthquake // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2003.—65.—P. 391—407.
12. Grimalsky V. V., Kremenetsky I. A., Rapoport Yu. G. Excitation of electromagnetic waves in the lithosphere and their

- penetration into ionosphere and magnetosphere // J. Atmos. Electricity.—1999.—19, N 2.—P. 101—117.
13. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys.—1960.—38.—P. 1441—1480.
14. Hooke W. H. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves // J. Atmos. and Terr. Phys.—1968.—30.—P. 795—823.
15. Huang C.-S., Sofko G. J., Keley M. C. Numerical simulation of midlatitude ionospheric perturbations produced by gravity waves // J. Geophys. Res.—1998.—103A.—P. 6977—6989.
16. Kendall P. C., Pickering W. M. Magnetoplazma diffusion at F2-region altitudes // Planet Space Sci.—1967.—15.—P. 825.
17. Liperovsky V. A., Meister C. V., Popov K. V., et al. On the time scales of some seismo-ionospheric effects // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Eds M. Hayakawa, O. A. Molchanov. — Tokyo: TERRAPUB, 2002.—P. 325—327.
18. Meister C. V., Liperovskaya E. V., Molchanov O. A., et al. To the question of spatial scales of seismo-ionospheric effects // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling // Eds M. Hayakawa, O. A. Molchanov. — Tokyo: TERRAPUB, 2002.—P. 3329—3331.
19. Molchanov O. A., M. Hayakawa, Rafalsky V. A. Penetration characteristics of electromagnetic emission from an underground seismic source into the atmosphere, the ionosphere, and magnetosphere // J. Geophys. Res.—1995.—100.—P. 1691—1712.
20. Parrot M. Statistical studies with satellite observations of seismogenic effects // Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. — Tokyo: TERRAPUB, 1999.—P. 685—695.
21. Porter H. S., Silverman S. M., Tuan T. F. On the Behavior of Airglow Under the Influence of Gravity Waves // J. Geophys. Res.—1974.—79, N 25.—P. 3831—3833.
22. Tronin A. A. Satellite thermal survey application for earthquake prediction // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena: associated with earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. — Tokyo: TERRAPUB, 1999.—P. 717—746.

THE RELATION BETWEEN CHARACTERISTICS OF A SINGLE LITHOSPHERIC SOURCE OF ACOUSTIC-GRAVITY WAVES AND IONOSPHERIC RESPONSE

O. E. Gotyanan, V. M. Ivchenko, and Yu. G. Rapoport

A three-dimensional numerical model of the acoustic-gravity wave (AGW) excitation from near ground lithospheric thermal source is developed. An ionospheric plasma linear response in F region of the ionosphere is obtained. A relationship between ionospheric response and AGW period is derived. A relationship between ionospheric response and geomagnetic field direction is investigated. The amplitude of relative electron concentration change in ionospheric plasma corresponds to AGW with typical periods of the order of 1 h. Such periods and absolute value of relative change of electron concentration in the ionospheric F layer coincide by the order of value with reported data of observations before earthquakes. The typical model value of relative electron concentration disturbances in the used model of ideal atmosphere is equal to several tens of percents at the F region altitudes.

УДК 533.9

Ю. А. Клименко, О. К. Черемных

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Київ

Особенности распределения заряда
на мелкодисперсных пылевых частицах
в низкотемпературной космической плазме

Для опису зарядових властивостей космічної пилової плазми засотовано метод детального балансу, що коректно враховує факт дискретності падаючого заряду на пилинку. Отримано систему рівнянь, яка дозволяє аналітично знайти вираз для форми стаціонарного зарядового розподілу на частинках пилу з великим і малим зарядом на ній. Визначено умови, при яких встановлений зарядовий розподіл є гауссовим. Показано, що поверхневий потенціал пилинки залежить від її радіуса і не є постійним, як звичайно вважається.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем в физике космической пылевой плазмы является проблема определения заряда на микрочастицах пыли, возникающей в магнитосфере и ионосфере Земли из-за извержений вулканов, продуктов сгорания метеоров, лесных пожаров, ракетных выхлопов, наземных взрывов и ряда других антропогенных факторов [2, 5, 7]. Пылевая плазма, в отличие от обычной, содержит микрочастицы (гранулы), которые за счет высокой мобильности электронов достаточно быстро накапливают отрицательный заряд, зависящий как от размеров гранул, так и от параметров космической плазмы.

В условиях термодинамического равновесия плазмы обычно предполагается, что потоки электронов ψ_e и ионов ψ_i на изолированную пылевую частицу должны уравновешивать друг друга ($\psi_e = \psi_i$). Эти потоки обычно рассчитываются из хорошо зарекомендовавшего себя метода ограниченных орбит [6, 7], и условие их равенства приводит к трансцендентному уравнению относительно потенциала φ_d на поверхности пилинки. Решение этого уравнения можно записать в виде $\varphi_d = zT_e/e$, где e — заряд электрона, T_e — измеряемая в энергети-

ческих единицах электронная температура плазмы, а число z близко к 2, не зависит от размеров микрочастиц пыли и слабо (логарифмическим образом) зависит от параметров плазменного окружения (концентрации ионов и электронов, отношением их масс $\mu = m_i/m_e$ и температур $\tau = T_i/T_e$). В частности, для водородной плазмы с одинаковыми температурами электронов и ионов $z = 2.5$ [6, 7]. Выразив емкость пылевой гранулы C через ее средний радиус a ($C = a$ в единицах СГС), несложно определить заряд пилинки по хорошо известной формуле $Q = \varphi_d/a$.

В пылевой плазме попадание электронов и ионов на пилинку является процессом случайным, что приводит к флюктуациям заряда на ней. Для расчета таких флюктуаций обычно предполагают, что элементарный заряд плазменных частиц (электронов и ионов) пренебрежимо мал по сравнению с текущим зарядом пилинки. Можно показать [3], что в этом случае задача сводится к решению уравнения Фоккера — Планка, определяющего эволюцию заряда пилинки в окрестности своего равновесного значения. Решение этого уравнения приводит к гауссову распределению.

Ограниченностю указанного подхода состоит в том, что он в существенной мере использует факт

малости элементарного заряда e в сравнении с зарядом Q пылинки. В эквивалентной форме это условие может быть записано в виде неравенства $\eta \equiv e^2/aT_e \ll 1$ [4]. Простые оценки показывают, что в газовом разряде ($T_e \approx 1...3$ эВ) с характерным размером пылинки $a \sim 0.1...10$ мкм этот параметр принимает значения $\eta \approx 10^{-2}...10^{-4}$. Для интересующей нас космической плазмы параметр η уже перестает быть малым вследствие ее низкотемпературности и меньшей дисперсности ее пылевого компонента. В частности, для мелкодисперсных пылевых частиц с размерами $a \approx 10$ нм, находящихся в плазме верхних слоев атмосферы ($T_e \approx 0.02$ эВ), получаем оценку $\eta \approx 7$.

Из приведенного примера следует, что в условиях космической плазмы, в отличие от плазмы лабораторной, число η может быть больше единицы, т. е. заряд на пылинке соизмерим с зарядом электрона e и уравнение Фоккера — Планка не может быть использовано для описания динамики ее зарядки. Следовательно, для исследования этого вопроса необходимо использовать другие методы расчета зарядки пылевой гранулы.

Изучение этого вопроса и является целью настоящей работы. Ниже, в рамках упомянутой выше модели ограниченных орбит, рассмотрен вопрос о стационарном распределении заряда на пылинках для случая произвольных значений числа η . Предложенный нами метод последовательно учитывает факт дискретного изменения заряда пылинки после попадания на нее электронов и ионов. Как и в предыдущей нашей работе [1], мы оперируем терминами вероятностей нахождения того или иного дискретного заряда на грануле. Мы покажем, что система уравнений, похожая на ту, из которой фактически и следует уравнение Фоккера — Планка, имеет аналитическое решение для распределения заряда при любых значениях η , и становится гауссовым только при $\eta \lesssim 1$. Найденные нами аналитические решения в двух предельных случаях больших и малых η позволяют фактически полностью решить проблему нахождения стационарного распределения заряда на пылевых гранулах в рамках вышеупомянутого метода ограниченных орбит.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В предположении однозарядности плазменных частиц и справедливости максвелловских распределений для их равновесных функций распределения метод ограниченных орбит дает следующие выражения для электронного (e) и ионного (i) потоков,

падающих на пылевую гранулу радиуса a :

$$\psi_e(n) = n_0 a^2 \left(\frac{8\pi T_e}{m_e} \right)^{1/2} \begin{cases} \exp(-\eta n), & n \geq 0, \\ 1 - \eta n, & n < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi_i(n) = n_0 a^2 \left(\frac{8\pi T_i}{m_i} \right)^{1/2} \begin{cases} 1 + \eta n/\tau, & n \geq 0, \\ \exp(\eta n/\tau), & n < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь n_0 — концентрация плазменных частиц, n — целочисленное зарядовое число, определяющее заряд пылинки $Q = ne$.

Для описания процессов зарядки пылевых гранул введем вероятность P_n того, что в текущий момент времени t зарядовое число пылевой частицы равно числу n . Раньше [1] мы показали, что эти вероятности должны удовлетворять бесконечной ($-\infty < n < \infty$) системе уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_n = & -P_n [\psi_e(n) + \psi_i(n)] + \\ & + P_{n-1} \psi_e(n-1) + P_{n+1} \psi_i(n+1) \end{aligned} \quad (3)$$

с нормировкой

$$\sum_n P_n = 1. \quad (4)$$

Система уравнений (3), дополненная в начальный момент времени условием $P_n(t=0) = \delta_{n,0}$, описывает эволюцию заряда изначально незаряженной пылинки в плазме. Приравнивание нулю правых частей уравнений (3) позволяет найти стационарное распределение заряда на грануле. Можно показать, что если последнее характеризуется большими зарядовыми числами ($n \gg 1$), то система (3), записанная в терминах заряда гранулы $Q = ne$ и линеаризованная по малому параметру e/Q в окрестности своего положения равновесия, эквивалентна уравнению Фоккера — Планка [3].

СТАЦИОНАРНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ БАЛАНСА

Для определения равновесного распределения заряда на пылинке найдем решения, вытекающие из системы линейных уравнений

$$\begin{aligned} P_n [\psi_e(n) + \psi_i(n)] = & \\ = P_{n-1} \psi_e(n-1) + P_{n+1} \psi_i(n+1). & \end{aligned} \quad (5)$$

Их легко найти, если увидеть, что решения другой системы уравнений

$$P_n = P_{n-1} \frac{\psi_e(n-1)}{\psi_i(n)} \quad (6)$$

автоматически являются решениями (5). Исполь-

зуя уравнение (6) и формулы (1), (2), выражаем вероятности P_n через вероятность P_0 нахождения пылинки в незаряженном состоянии

$$\frac{P_n}{P_{n-1}} = C_n^+ \equiv \frac{\sqrt{\tau\mu} \exp[-\eta(n-1)]}{\tau + \eta n}, \quad n > 1, \quad (7)$$

$$\frac{P_{n-1}}{P_n} = C_n^- \equiv \frac{\sqrt{\tau/\mu} \exp(\eta n/\tau)}{1 - \eta(n-1)}, \quad n < -1. \quad (8)$$

Отсюда вытекают аналитические выражения для стационарного распределения заряда на пылинке для $n \geq 0$:

$$P_n = P_0 (\tau\mu)^{n/2} \exp[-\eta n(n-1)/2] \left[\prod_{k=1}^n (\tau + \eta k) \right]^{-1}. \quad (9)$$

Что касается $n < 0$, то для типичных параметров космической плазмы ($\mu > 1800$, $\tau \leq 1$) из выражений (7) и (8) следует, что этими вероятностями P_n можно пренебречь по сравнению с вероятностями P_n для положительных значений n . Таким образом, формула (9) и нормировка (4) дают искомое аналитическое распределения для заряда на пылинке. Отметим, что формула (7) также проясняет характер поведения вероятностей P_n : в области, где монотонно убывающая величина C_n^+ больше единицы, вероятность P_n будет возрастать, достигать максимума вблизи $C_n^+ \approx 1$, а затем с увеличением числа n монотонно убывать.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ СЛУЧАИ ЗАРЯДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В случае, когда параметр η становится малым, аналитическая запись (9) для стационарного зарядового распределения является не совсем удобной, поскольку она выражает конечные величины P_n через значение $P_0 \ll 1$. Поэтому удобнее получить аналитическое выражение для зарядового распределения, в котором все величины P_n выражаются в терминах его максимального значения. Для реализации этого подхода запишем известное трансцендентное уравнение [6, 7]

$$\sqrt{\tau\mu} \exp(-z) = \tau + z, \quad z = \eta N_0, \quad (10)$$

которое определяет заряд $Q = N_0 e$ пылинки и ее поверхностный потенциал $\varphi_d = eN_0/a$ из равенства падающих на нее электронного и ионного потоков.

Поскольку решение для N_0 , вытекающее из (10), как правило, не получается целым, положим $N = N_0 - \delta$, где N — целая часть от N_0 , а $0 < \delta < 1$. Используя (6) и формулы (1), (2), (10) выразим все вероятности P_{N+k} ($k \geq 1$) через P_N . В результате получаем выражения

$$P_{N+k} = P_{N+k-1} \frac{\exp[-\eta(k-\delta-1)]}{1 + \eta(k-\delta)/(\tau+z)}, \quad (11)$$

$$P_{N-k} = P_{N-k+1} \left[1 - \frac{\eta(k+\delta-1)}{\tau+z} \right] \exp[-\eta(k+\delta)], \quad k \leq N, \quad (12)$$

использование которых позволяет найти аналитические выражения для зарядового распределения. Ввиду громоздкости последних мы их не приводим.

Теперь, используя неравенство $\eta \ll 1$, с необходимой точностью, заменим линейные слагаемые в (11), (12) соответствующими экспонентами. Осуществив довольно очевидную процедуру математической индукции и возвращаясь к текущему индексу $n = N + k$, получаем выражение

$$P_n = C \exp \left[-\frac{\eta'(n-N_0-\Delta)^2}{2} \right], \quad 0 \leq n < \infty, \quad (13)$$

в котором числа N и δ уже не входят явно. Здесь использованы обозначения

$$\eta' = \eta \frac{\tau+z+1}{\tau+z}, \quad \Delta = \frac{\tau+z-1}{2(\tau+z+1)}. \quad (14)$$

От формулы (13) легко перейти к нормированным выражениям для вероятностей P_n , поскольку на основании предполагаемой малости параметра η сумму по n в нормировке (4) можно заменить соответствующим интегралом. После интегрирования получаем

$$P_n = \sqrt{\frac{\eta'}{2\pi}} \exp \left[-\frac{\eta'(n-N_0-\Delta)^2}{2} \right], \quad 0 \leq n < \infty. \quad (15)$$

Знание вероятностей (15) позволяет найти среднее значение зарядового числа на пылинке

$$\bar{N} = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = N_0 + \Delta, \quad (16)$$

из которого следует важное соотношение

$$Z \equiv \frac{e\bar{\varphi}_d}{T_e} \equiv \eta \bar{N} = \mu N_0 + \eta \Delta = z + \eta \Delta, \quad (17)$$

(см. (10)), указывающее на линейный характер зависимости потенциала $\bar{\varphi}_d$ пылинки от параметра η .

Формулы (15) и (17) при $\Delta \equiv 0$ переходят в известные формулы

$$P_n = \sqrt{\frac{\eta'}{2\pi}} \exp \left[-\frac{\eta'(n - N_0)^2}{2} \right], \quad (18)$$

$$Z \equiv \frac{e\bar{\varphi}_d}{T_e} = z, \quad (19)$$

полученные из решения уравнения Фоккера — Планка [3]. Как показано в приложении, наблюдаемое качественное различие в поведении функций (17) и (19) обусловлено тем, что трансцендентное

уравнение (10), полученное из приравнивания электронного и ионного потоков, падающих на пылинку, определяет ее заряд лишь в нулевом приближении по параметру η .

Для сравнения полученных нами результатов с полученными ранее на рис. 1 представлены результаты численных расчетов для вероятности распределения заряда на пылевой грануле в зависимости от ее размера, полученные из точных формул (11), (12) и нормировки (4); из приближенной формулы (15) и из ранее известной формулы (18) для пылинок радиуса $a = 10, 1, 0.1$ и 0.01 мкм (рис. 1, a — ε) для водородной плазмы ($m_i/m_e = 1836$) при $T_e = T_i = 200$ К. Указанным значениям радиуса пылинки соответствуют значения параметров $\eta = 0.0072, 0.072, 0.72$ и 7.2 соответственно. Из рис. 1, a и b видно, что зависимости (15) и (18)

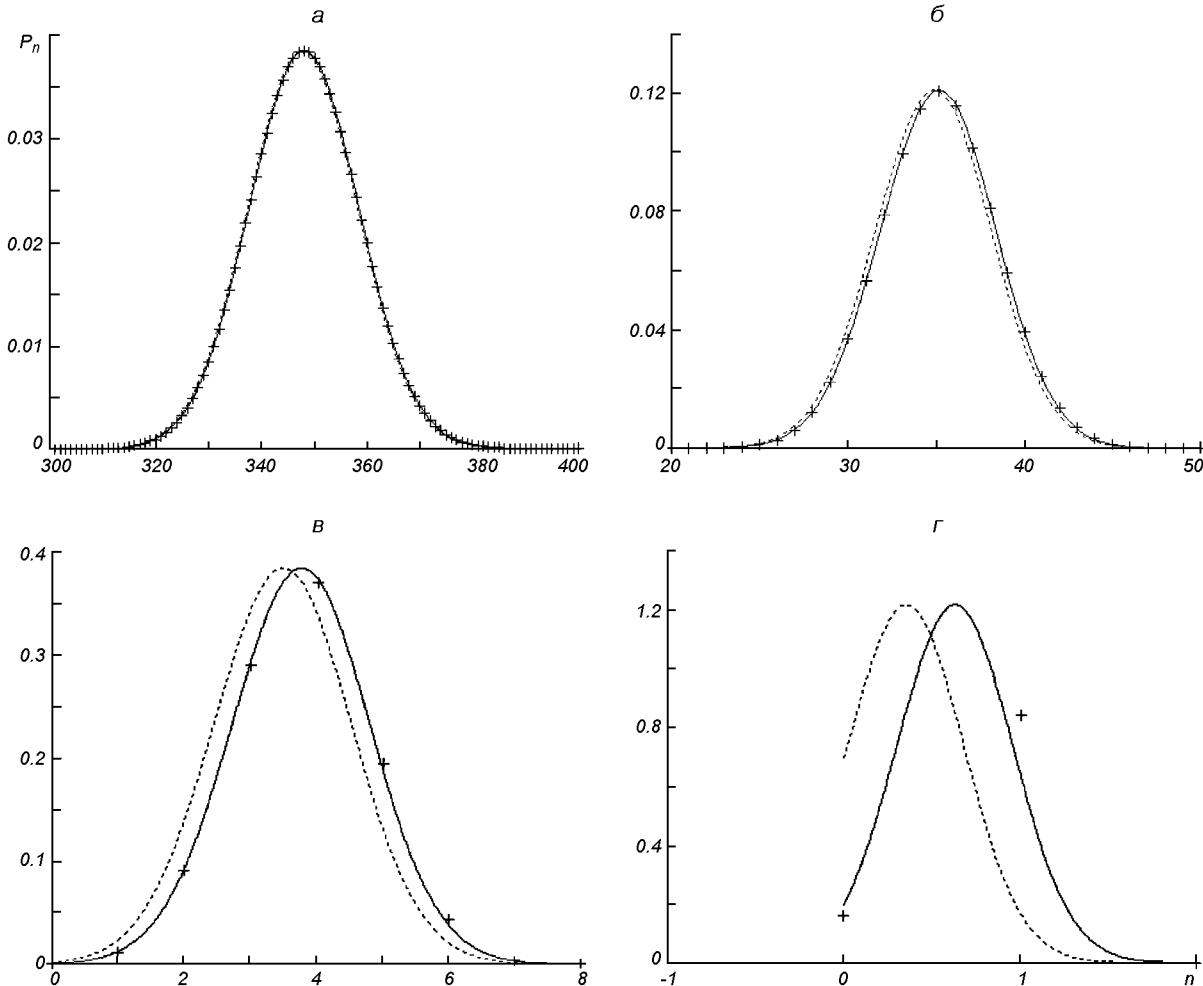


Рис. 1. Нормированное распределение заряда на пылевой грануле с размерами $a = 10$ мкм (a), 1 мкм (b), 0.1 мкм (c) и 0.01 мкм (d). Крестики — точное распределение, сплошная линия — формула (15), штриховая линия — расчет по приближенной формуле (18). Параметры расчета см. в тексте

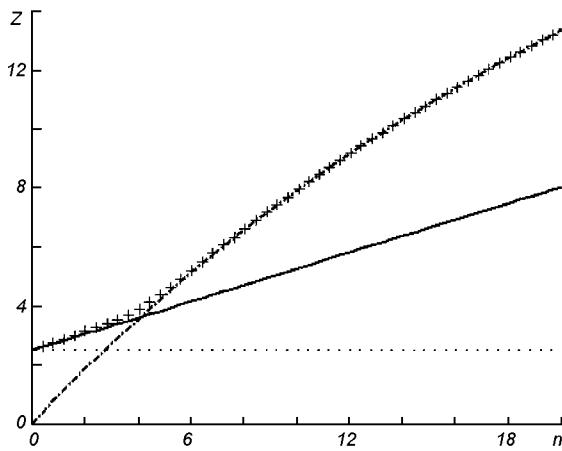


Рис. 2. Зависимость величины $Z = e\bar{\varphi}_d/T_e$ от $\eta = e^2/aT_e$. Крестики — значения точной кривой; сплошная линия — зависимость (17), штриховая линия — прямая (19); штрих-пунктирная линия — аппроксимационная формула (23) для случая, описываемого неравенством (21). Параметры расчета см. в тексте

практически неотличимы от кривой точного распределения. При $\eta \sim 1$ (рис. 1, в) распределение (18) отличается от точного, в то время как разница между полученной нами зависимостью (15) и точной кривой не наблюдается.

Таким образом, приближенная формула (15) практически точно описывает зарядку пылинки вплоть до значений $\eta \sim 1$. В то же время, как видно из рис. 1, г, обе аппроксимационные кривые, построенные по формулам (15) и (18), не описывают случая $\eta \gg 1$.

На рис. 2 приведены результаты численного расчета для величины $Z = e\bar{\varphi}_d/T_e \equiv \eta\bar{N}$ как функции параметра η для водородной плазмы ($\mu = 1836$) и $\tau = 1$. Крестики на этом рисунке отвечают точному расчету, полученному из формул (11), (12) и нормировки (4) по описанной выше методике. Сплошная линия соответствует зависимости (17), а штриховая линия — ранее известной зависимости (19).

Результаты, приведенные на рис. 2, со всей очевидностью указывают на то, что потенциал $\bar{\varphi}_d$ на поверхности пылинки не является величиной постоянной, как это считалось ранее, а является функцией η . Для случая $\eta < 1$ этот потенциал может быть определен из линейной аппроксимации (17), при подстановке в которую явного выражения для параметра η несложно получить

$$\bar{\varphi}_d = \frac{zT_e}{e} + \frac{e\Delta}{a}, \quad \frac{e^2}{aT_e} \ll 1. \quad (20)$$

Теперь перейдем к значениям η , таким, что

$$\eta \geq \ln\sqrt{\tau\mu}, \quad (21)$$

когда согласно (7) все вероятности P_n очень быстро уменьшаются с увеличением числа n . Поэтому мы можем ограничиться только нулевым и первым членами этого распределения, полагая оставшиеся равными нулю. В результате получаем следующие нормированные решения:

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{\tau + \eta}{\tau + \eta + \sqrt{\tau\mu}}, \\ P_1 &= \frac{\sqrt{\tau\mu}}{\tau + \eta + \sqrt{\tau\mu}}, \\ P_{n \geq 2} &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$

откуда

$$Z \equiv \frac{e\bar{\varphi}_d}{T_e} \equiv \eta\bar{N} = \eta P_1 = \frac{\eta\sqrt{\tau\mu}}{\tau + \eta + \sqrt{\tau\mu}}. \quad (23)$$

График этой функции приведен на рис. 2 штрих-пунктирной линией и практически точно совпадает с точной кривой $Z(\eta)$ для случая $\eta \geq 1$.

Для водородной плазмы с одинаковыми температурами электронов и ионов условие (21) эквивалентно неравенству $\eta \geq 3.76$, которое может реализоваться для пылинок с радиусом 0.05 мкм и меньше. Еще одной важной характерной особенностью распределений с такими значениями η является дробно-линейная, а не логарифмическая (как для случая $\eta \ll 1$) зависимость функции Z от η , а значит, и потенциала $\bar{\varphi}_d$ пылинки от параметра $\sqrt{\tau\mu}$. Из выражения (22) также легко видеть, что максимальное значение функции $Z(\eta)$ достигается при $\eta \rightarrow \infty$ и является конечным: $Z(\eta \rightarrow \infty) = \sqrt{\tau\mu}$. Таким образом, функция $Z(\eta)$ является ограниченной во всей области своего определения, и в пределе бесконечно малых размеров пыли может достигать значений в несколько десятков единиц.

выводы

В работе показано, что распределение заряда на пылинках космической плазмы описывается распределением Гаусса (15) вплоть до значений $\eta \leq 1$. Обычно считается, что гауссово распределение описывается формулой (18) и справедливо в области $\eta \ll 1$. Таким образом, впервые получено обобщение формулы для зарядового распределения на пылинке на случай $\eta \sim 1$.

Нами также впервые установлено, что потенциал $\bar{\varphi}_d$ на поверхности пылинки зависит от ее радиуса a , причем для случая $\eta \ll 1$ эта зависимость линейна по η , а не постоянна, как обычно считается. Для случаев малых и больших η нами найдены простые аналитические решения (формулы (17) и (23)), которые практически точно позволяют описать поведение потенциала $\bar{\varphi}_d$ от параметра η , либо от радиуса a пылинки.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ ФОРМУЛЫ (10)

Перепишем систему уравнений (3) в терминах заряда $Q = ne$. В результате, обозначив $P_n \equiv W(Q)$, получаем уравнение

$$\frac{d}{dt} W(Q) = -W(Q)[\psi_e(Q) + \psi_i(Q)] + \\ + W(Q - e)\psi_e(Q - e) + W(Q + e)\psi_i(Q + e),$$

являющееся исходным для получения уравнения Фоккера — Планка [3].

Рассматривая заряд $Q \gg |e|$ как непрерывную переменную (см. [3]) и предполагая, что равновесный заряд Q на пылинке определяется точным балансом электронного и ионного потоков, получаем формулу (10). Ниже, исходя из уравнений (1) — (3) в приближении $n \gg 1$, покажем, что последнее утверждение не является точным, а выполняется только в нулевом приближении по параметру $\eta \ll 1$.

Умножим каждое из уравнений системы (3) на n и просуммируем результат по всем возможным положительным состояниям n пылинки. В полученном выражении осуществим очевидные замены индексов суммирования и введем величину среднего значения $\bar{N} = \sum n P_n$ распределения P_n . В результате получаем уравнение

$$\frac{d}{dt} \bar{N} = \sum \psi_e(n) - \sum P_n \psi_i(n). \quad (\Pi 1)$$

Учитывая линейную зависимость ионного потока (2) от индекса $n > 0$, перепишем (П1) в виде

$$\frac{d}{dt} \bar{N} = \sum P_n \psi_e(n) - \psi_i(\bar{N}). \quad (\Pi 2)$$

Из последнего уравнения видно, что равновесное

зарядовое число \bar{N} пылинки (или равновесный заряд Q на ней, что одно и то же) не определяется точным равенством электронного $\psi_e(\bar{N})$ и ионного $\psi_i(\bar{N})$ потоков, поскольку

$$\sum P_n \psi_e(n) \neq \psi_e(\bar{N}) \quad (\Pi 3)$$

из-за нелинейности функции $\psi_e(n > 0)$, см. (1). В частности, левая часть (П3) при подстановке в нее известного распределения Гаусса (18) приводит к соотношению

$$\sum P_n \psi_e(n) = \psi_e(N_0) \exp \left[\frac{\eta(\tau + z)}{2(\tau + z + 1)} \right],$$

которое совпадает с правой частью (П3) только в нулевом приближении по параметру η .

Работа выполнена при поддержке УНТЦ, грант номер NN-37.

1. Клименко Ю. А., Черемных О. К. О распределении заряда на пылевых частицах космической плазмы // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 4.—С. 67—72.
2. Kotsarenko N. Ya., Koshevaya S. V., Kotsarenko A. N. Dusty plasma in space // Geofisica Internetional.—1998.—37, N 2.—P. 71—86.
3. Matsoukas T., Russel M. Fokker—Planck description of particle charging in ionized gases // Phys. Rev. E.—1997.—55, N 1.—P. 991—994.
4. Schram P. P. J. M., Trigger S. A., Zagorodny A. G. New microscopic and macroscopic variables in gusty plasmas // New J. Phys.—2003.—N 5.—P. 27.1—27.7.
5. Shukla P. K. New collective processes in dusty plasmas: applications to space and laboratories // Plasma Phys. Control. Fusion.—2000.—N 42.—P. 213—221.
6. Shukla P. K., Mamun A. A. Introduction to dusty plasma physics. — London: IOP Publ. Ltd, 2002.—265 p.
7. Tsytovich V. N. Dust plasma crystals, drops, and clouds // Phys.—Uspekhi.—1997.—40, N 1.—P. 53—94.

CHARGE DISTRIBUTION FEATURES OF FINE-DISPERSED DUST GRAINS IN LOW-TEMPERATURE SPACE PLASMA

Yu. O. Klymenko and O. K. Cheremnykh

To describe charge properties of space dusty plasma, we applied the detailed balance method which takes adequately into account the discreteness of charge inflow on a dust grain. A system of equations is obtained which enables us to find analytically the shape of the charge probabilities with great and small charges on a dusty grain. We found the conditions under which the steady-state charge distribution is Gaussian shaped one. The grain surface potential is demonstrated to depends on the grain radius but to be not constant as generally believed.

УДК 523.98

Г. Б. Гельфрейх¹, Ю. Т. Цап², Ю. Г. Копылова¹, Л. И. Цветков²,
Т. Б. Гольдварг³, Ю. А. Наговицин¹, Ю. Ф. Юровский², И. А. Будзиновская²

¹Головна (Пулковська) астрономічна обсерваторія РАН, Санкт-Петербург, Росія

²НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», п. Наукове, Крим

³Калмицький державний університет, м. Еліста, Росія

О природе пульсаций микроволнового излучения солнечных активных областей

На основі спостережних даних, отриманих у вересні 2001 р. за допомогою РТ-22 НДІ «КрАО», методами вейвлет-аналізу досліджуються квазіперіодичні варіації мікрохвильового випромінювання на частотах 8.6 і 15.4 ГГц активних областей Сонця з періодами менш ніж 10 хв. Виявлені пульсації випромінювання з періодами 10—40 с пов'язуються з альвенівськими збуреннями. Встановлено, що внаслідок теплопровідних втрат акустичні моди з періодами менш ніж 1 хв зазнають сильної дисипації в нижній короні Сонця. У рамках однорідної моделі проведено аналіз впливу акустичних і альвенівських осциляцій на теплові механізми мікрохвильового випромінювання. Обговорюються ймовірні джерела нагрівання сонячної корони.

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительно недавно с запуском орбитальных станций SOHO и TRACE возникло новое направление исследований колебаний магнитных структур верхней атмосферы Солнца, названное корональной сейсмологией. Столь большой интерес, связан в первую очередь с решением проблемы нагрева солнечной короны магнитогидродинамическими (МГД) волнами, а также с возможностью совершенствования методов диагностики корональных магнитных полей.

В сентябре 2001 г. на базе РТ-22 (λ 2.0 и 3.5 см) и РТ-3 (λ 10.5 и 12.0 см) НИИ «КрАО» проводились многочасовые наблюдения активных областей Солнца. После обработки наблюдательных данных негармоническими методами (вейвлет-анализ) были получены следующие результаты [1]:

1) наибольшей амплитудой в динамических спектрах мощности обладают минутные колебания с периодом $T_p = 3\ldots5$ мин;

2) в некоторых случаях амплитуды колебаний с $T_p = 10\ldots40$ с сравнимы с минутными, тогда как

секундные осцилляции ($T_p < 10$ с) всегда отсутствуют;

3) квазипериодические пульсации имеют вид низкодобротных цугов.

Кроме того, согласно результатам наблюдений, проведенных на радиогелиографе Nobeyama и VLA, глубина модуляции микроволнового излучения над солнечными пятнами может изменяться в широких пределах — от одного до двадцати процентов, причем данные изменения никак не связаны с нестационарными явлениями в источнике излучения [6, 8].

В свете изложенного выше в представленной работе исследуются диссипативные и модуляционные процессы, вызванные распространением МГД-волн в атмосфере Солнца.

О ДИССИПАЦИИ МГД-ВОЛН

Для того чтобы выяснить, какие моды ответственные за осцилляции с короткими периодами [1], рассмотрим диссиацию акустических волн, обуслов-.

ленную ионной вязкостью, электронной теплопроводностью и радиационными потерями.

Тепловые энергии, выделяющиеся из-за ионной вязкости E_v и электронной теплопроводности E_c , а также радиационные потери E_r после усреднения по периоду осцилляций можно представить следующим образом [3, 5]:

$$\begin{aligned} E_v &= \frac{\eta_0}{6} (\nabla \delta v)^2, \\ \eta_0 &= 0.96 n k_B T \tau_i; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{\kappa_{\parallel}}{2} \left(\frac{k}{\omega} \right)^2 k_B T (\gamma - 1)^2 (\nabla \delta v)^2, \\ \kappa_{\parallel} &= 3.16 \frac{n k_B T \tau_e}{m}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{(3 - \gamma)(5 - \gamma)}{16} \frac{n^2 R(T)}{\omega^2} (\nabla \delta v)^2, \\ R(T) &= \frac{5 \cdot 10^{-20}}{\sqrt{T}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь использованы стандартные обозначения, а характерные времена столкновений ионов τ_i и электронов τ_e связаны соотношением [4]

$$\tau_i = \sqrt{\frac{2M}{m}} \tau_e \approx 17 \frac{T^{3/2}}{n \Lambda}, \text{ с.} \quad (4)$$

где $\Lambda = 25.3 - 1.15 \lg n + 2.3 \lg T$ — кулоновский логарифм, в котором температура T выражена в электронвольтах, концентрация n — в см^{-3} . Заметим, что принятая в (3) зависимость функции радиационных потерь $R(T)$ от температуры соответствует температурному интервалу $T = 10^6 - 10^{7.6}$ К для оптически тонкого источника [3].

Декремент затухания $\gamma < \omega$ запишем в виде

$$\gamma = \frac{E}{2W}. \quad (5)$$

Здесь W — плотность волновой энергии, которая для акустических волн (медленные моды) при малых значениях плазменного параметра

$$\beta \approx c_s^2/v_a^2 \ll 1,$$

где c_s и v_a — скорость звука и альвеновская скорость соответственно, представима в виде [4]

$$W = c_s^2 \frac{\delta \rho}{2\rho} \quad (6)$$

(ρ — плотность плазмы). Учитывая линеаризованное уравнение непрерывности

$$-i\omega \delta \rho + \rho \nabla \delta v = 0$$

и подставляя (1)–(4) и (6) в (5) для декрементов, обусловленных ионной вязкостью, электронной теплопроводностью и радиационными потерями, соответственно находим

$$\begin{aligned} \gamma_v &\approx 0.1 \omega^2 \frac{T^{3/2}}{n}, \\ \gamma_c &\approx 10 \omega^2 \frac{T^{3/2}}{n}, \\ \gamma_r &\approx 5 \cdot 10^{-5} \frac{n}{T^{3/2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Согласно (7) в условиях нижней короны диссипация медленных мод определяется электронной теплопроводностью, и поскольку период $T_p = 2\pi/\omega$, то декремент затухания акустических колебаний представим в виде

$$\frac{\gamma}{\omega} \approx \frac{63 T^{3/2}}{n T_p}. \quad (8)$$

При $T = 10^6$ К, $n = 10^9 - 10^{10}$ см $^{-3}$, из выражения (8) получим $\gamma/\omega \approx 63 \cdot (0.1 - 1)/T_p$. Отсюда следует, что акустические колебания с $T_p \leq 1$ мин подвержены сильной диссипации, что делает их обнаружение в нижней короне крайне проблематичным. Действительно, в этом случае амплитуда колебаний уменьшится в e раз за время $t = 1/\gamma \approx 2.5 \cdot (10^{-3} - 10^{-2}) T_p^2$, которое при $T_p = 60$ с составит 0.15–1.5 мин.

Альвеновские возмущения в отличие от акустических мод не сжимают плазму, поэтому они подвержены диссипативным процессам в гораздо меньшей степени.

Кроме того, поскольку альвеновские волны с периодами меньше нескольких десятков секунд сильно затухают в хромосфере [4], то это предполагает, что за колебания микроволнового излучения с $T_p = 10 \dots 40$ с ответственны данные моды.

Поток энергии альвеновских волн можно представить в виде

$$F = \frac{\rho(\delta v)^2}{2} v_A, \quad (9)$$

где $v_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$ — альвеновская скорость и δv — амплитуда возмущений.

Полагая в нижней короне $\rho = 10^{-15} - 10^{-14}$ г/см 3 , $v_A = 10^8$ см/с и $\delta v = 10^7$ см/с, из (9) находим $F = 0.5 \dots 5$ Дж·см $^{-2}$ с $^{-1}$. Поскольку для нагрева спокойных и активных областей требуются потоки 0.03 и 1 Дж·см $^{-2}$ с $^{-1}$ соответственно, то альвеновские волны вполне могут обеспечить высокую температуру корональной плазмы.

МОДУЛЯЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В рамках однородной модели рассмотрим влияние акустических и альвеновских возмущений на модуляцию микроволнового излучения активных областей. Ограничимся анализом тепловых механизмов (тормозного и магнитотормозного), определив глубину модуляции следующим образом:

$$M = \delta I(x)/I(x), \quad (10)$$

где $\delta I(x) = I(x + \delta x) - I(x)$ — изменение интенсивности излучения, вызванное некоторым малым возмущением с амплитудой $\delta x \ll x$.

Акустические моды. Предположим, что линейные колебания являются адиабатическими. Тогда для интенсивностей оптически толстого (I_1) и оптически тонкого (I_2) излучения имеем [2]

$$I_1 \propto T,$$

$$I_2 \propto \begin{cases} n^2/\sqrt{T} & \text{(тормозной),} \\ nT^s & \text{(магнитотормозной).} \end{cases}$$

Отсюда с учетом (10) получим для глубин модуляции

$$M_1 = \delta T/T, \quad (11)$$

$$M_2 = \begin{cases} (5/6)\delta T/T & \text{(тормозной),} \\ (s+2/3)\delta T/T & \text{(магнитотормозной),} \end{cases} \quad (12)$$

где $s \geq 2$ — номер циклотронной гармоники. Как видно из (11) и (12), глубина модуляции M зависит от оптической толщины, и для оптически тонкого

кого гирорезонансного излучения с ростом номера гармоники s возрастает. Если принять во внимание, что основной вклад в микроволновое излучение активных областей Солнца дают гармоники с $s \leq 4$, то при переходе от оптически толстого источника к оптически тонкому при прочих равных условиях M может возрасти всего в несколько раз.

Альвеновские моды. Возмущения данного типа не сжимают плазму, а лишь изменяют направление магнитного поля, поэтому мы ограничимся анализом влияния альвеновских возмущений на модуляцию оптически тонкого гирорезонансного излучения при различных углах между направлением магнитного поля и волновым вектором α .

В квазипродольном приближении [2] для глубины модуляции необыкновенных (e) и обыкновенных (o) волн, учитывая, что оптическая толщина

$$\tau_c \propto \sin^{2s-2}\alpha(1 \pm \cos\alpha)^2,$$

а также, принимая во внимание (10), получим

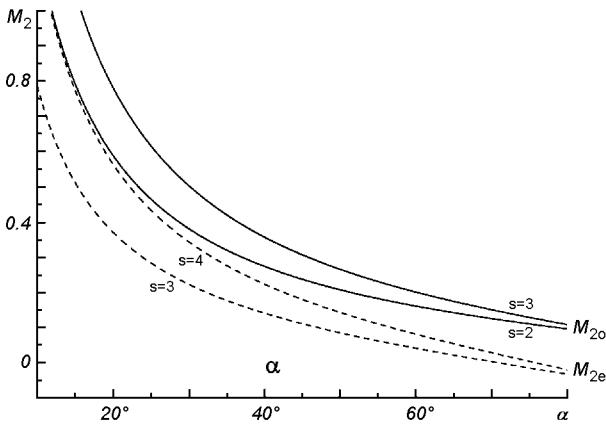
$$M_{2e} = [(2s-2)\operatorname{ctg}\alpha - 2\operatorname{tg}(\alpha/2)]\delta\alpha,$$

$$M_{2o} = [(2s-2)\operatorname{ctg}\alpha + 2\operatorname{ctg}(\alpha/2)]\delta\alpha.$$

Зависимости $M_{2e}(\alpha)$ при $s = 3, 4$ и $M_{2o}(\alpha)$ при $s = 2, 3$ представлены на рисунке. Прежде всего обращает на себя внимание, что глубина модуляции может достигать достаточно больших значений, и с увеличением номера гармоники s увеличивается, тогда как с увеличением угла α , наоборот, уменьшается. Причем обыкновенная волна модулируется более эффективно, чем необыкновенная. Применительно к наблюдениям это предполагает, что если колебания параметров Стокса I и V вызваны альвеновскими возмущениями, то они могут происходить как в фазе, так и противофазе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выявленные методами вейвлет-анализа десятисекундные осцилляции микроволнового излучения активных областей мы связали с альвеновскими возмущениями, так как они в отличие от других МГД-мод подвержены диссипативным процессам в наименьшей степени. По нашему мнению, именно данные моды ответственны за нагрев Солнечной короны. Вопрос о существовании секундных осцилляций излучения в активных областях, обнаруженных в оптическом диапазоне Вильямсом и др. [9], по-прежнему остается открытым [7]. Не исключено, что пульсации с короткими периодами могут возбуждаться лишь вследствие вспышечного энерговыделения.



Зависимость глубины модуляции M_2 оптически тонкого источника от угла α между направлением магнитного поля и волновым вектором обыкновенной (o) и необыкновенной (e) волны ($\delta\alpha = 2^\circ$)

В соответствии с полученными результатами в рамках однородной модели не удается объяснить наблюдаемый на VLA и NoRH разброс по глубине модуляции минутных пульсаций микроволнового излучения, что свидетельствует о необходимости учета эффектов, связанных с неоднородностью плазмы и магнитного поля.

Как следует из проведенного анализа, для оптически тонкого источника альвеновские возмущения приводят к значительной модуляции гирорезонансного излучения, глубина которой существенно зависит от поляризации излучаемых волн. Поэтому колебания параметров Стокса I и V могут происходить как в фазе, так и в противофазе.

Работа поддержана грантом ИНТАС № 00-543 и частично грантом РФФИ № 03-02-17218.

1. Гельфрейх Г. Б., Гольдварт Т. Б., Копылова Ю. Г. и др. О вариациях микроволнового и дециметрового излучения в активных областях солнечной атмосферы // Тр. междунар. конф. «Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца». — С-Пб: ГАО РАН, 2002.—С. 127—132.
2. Желязняков В. В. Электромагнитные волны в космической плазме. — М.: Наука, 1977.—432 с.
3. Прист Э. Р. Солнечная магнитная гидродинамика. — М.: Мир, 1985.—589 с.
4. De Pontieu, Martens P. C., Hudson H. S. Chromospheric damping of Alfvén waves // *Astrophys. J.*—2001.—558, N 2.—P. 859—871.
5. Gordon B. E., Hollweg J. V. Collisional damping of surface waves in the solar corona // *Astrophys. J.*—1983.—266,

- N 1.—P. 373—382.
6. Nindos A., Alissandrakis C. E., Gelfreikh G. B., et al. Spatially resolved microwave oscillations above a sunspot // *Astron. and Astrophys.*—2002.—386, N 2.—P. 658—673.
7. Rudawy P., Phillips K. J. H., Read P., et al. Search for short period coronal plasma oscillations: SECIS results from 1999 and 2001 total eclipse // Proc. 10th European Solar Physics Meeting «Solar Variability From Core to Outer Frontiers». — Prague, 2002.—P. 967—970.
8. Shibasaki K. Microwave detection of umbral oscillations in NOAA active region 8156: diagnostics of temperature minimum in sunspot // *Astrophys. J.*—2001.—550, N 2.—P. 1113—1118.
9. Williams D. R., Phillips K. J. H., Rudawy P., et al. High-frequency oscillations in a solar active region coronal loop // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—326.—P. 428—436.

ON THE NATURE OF MICROWAVE PULSATIONS FROM SOLAR ACTIVE REGIONS

G. B. Gelfreikh, Yu. T. Tsap, Y. G. Kopylova,
L. I. Tsvetkov, T. B. Goldvarg, Y. A. Nagovitsin,
Y. F. Yurovsky, I. A. Budzinovskaya

On the basis of observed data obtained with the radio telescope RT-22 of the Crimean Astrophysical Observatory at 8.6 and 15.4 GHz the quasi-periodic variations of microwave radiation from solar active regions with periods less than 10 min are investigated. The revealed oscillations with periods of 10—40^s were connected with the Alfvén disturbances. It was established that acoustic modes with periods less than 1 min strongly dissipate in lower corona due to the thermal conductivity. Within the framework of the homogeneous model the influence of acoustic and Alfvén oscillations on the thermal mechanisms of microwave radiation is analyzed. The probable sources of the coronal heating are discussed.

УДК 523.98

С. И. Гопасюк, О. С. Гопасюк

НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», п. Наукове, Крим

Движение плазмы над областью температурного минимума

Над тінню деяких плям можливе прискорення плазми від 0.1 км/с над областю температурного мінімуму до 16—20 км/с у перехідній області хромосфера — корона. Одночасно із прискоренням плазми відбувається її нагрівання від 3500 К в області температурного мінімуму до 10^5 К в області утворення лінії С IV λ 154.8 нм. Такий характер змін з висотою швидкості та температури плазми можливий при наявності зовнішнього поля, що діє на плазму. Визначено, як має змінюватися з висотою сила та енергія, що підводяться до плазми, щоб створити спостережуване поле швидкостей і температури плазми.

ВВЕДЕНИЕ

Движения плазмы над тенью пятен привлекательны тем, что они происходят в сильном магнитном поле, ориентированном преимущественно вертикально. Наблюдения поля лучевых скоростей, измеренных в пятнах по линиям разной интенсивности, показали, что крупномасштабные движения в хромосфере над тенью пятна не являются прямым продолжением движений в фотосфере [2]. В работе [3] мы высказали предположение, что в области температурного минимума происходит эффективная диффузия плазмы в магнитное поле тени пятна.

Наблюдения по УФ-линиям пока довольно редки. И естественно, не имеется достаточных наблюдательных данных, на основании которых можно было бы сделать вывод о степени регулярности направления крупномасштабных движений плазмы и величине их скорости. Тем не менее, наблюдения в линии С IV λ 154.8 нм над тенью некоторых пятен в переходной области хромосфера — корона выявили подъем вещества [5, 6, 11, 12, 15].

Здесь исследования движений плазмы над тенью пятен проведены в пределах высот температурный минимум — переходная область хромосфера — корона.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Значения потоковых скоростей плазмы над тенью пятна взяты по результатам данных наблюдений в трех линиях: Fe I λ 527.0 нм [2], H _{β} [1] и С IV λ 154.8 нм [5, 12, 15]. Наблюдения в Fe I λ 527.0 нм и H _{β} относятся к одним и тем же четырем одиночным пятнам. Скорости, измеренные в С IV λ 154.8 нм, относятся к другим пятнам.

Линия Fe I λ 527.0 нм образуется на высоте около 600 км над фотосферой [4] и располагается в области температурного минимума. Средняя по тени пятна скорость направлена вверх и равна 0.1 км/с. Высота образования линии H _{β} в среднем составляет 1400 км [13], а средняя скорость в тени пятна — направлена вверх и равна 0.7 км/с. Линия С IV λ 154.8 нм формируется над пятном в переходной области хромосфера — корона при температуре 10^5 К [10, 16]. Исследования [9] показали, что высота образования С IV λ 154.8 нм должна быть 4000—6000 км. Мы приняли высоту формирования ее равной 4000 км, а среднюю по тени пятна скорость движения плазмы вверх равной 16 км/с.

На рис. 1 нанесены величины средних по площади тени вертикальных скоростей в зависимости от высоты образования линий. Отсчет высот взят от

уровня образования Fe I $\lambda 527.0$ нм. Мы считаем, что в пределах этих высот изменение скорости происходит непрерывно и квазистационарно.

Линия C IV $\lambda 154.8$ нм присутствовала над пятнами во всех наблюдениях. Это означает:

1. Над тенью пятна всегда имеет место рост температуры примерно от 3500 К в области температурного минимума до 10^5 К — на высоте формирования линии C IV $\lambda 154.8$ нм.

2. Над тенью по крайней мере некоторых пятен наблюдается подъем плазмы с увеличивающейся скоростью (средней по площади тени) от 0.1 км/с непосредственно над областью температурного минимума до 16 км/с на высоте формирования линии C IV $\lambda 154.8$ нм.

ТЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В ТРУБКЕ ТОКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ

Рассмотрено воздействие внешнего поля на поток проводящего газа в трубке тока, которая по геометрии совпадает с магнитной силовой трубкой. Нас интересует изменение параметров этого поля вдоль трубы тока, которое приводит к наблюдаемому изменению скорости и распределению температуры плазмы вдоль оси трубы тока, которая принята за ось z в цилиндрической системе координат.

Уравнения, описывающие движения плазмы в трубке тока, расположенной вертикально, можно записать в виде

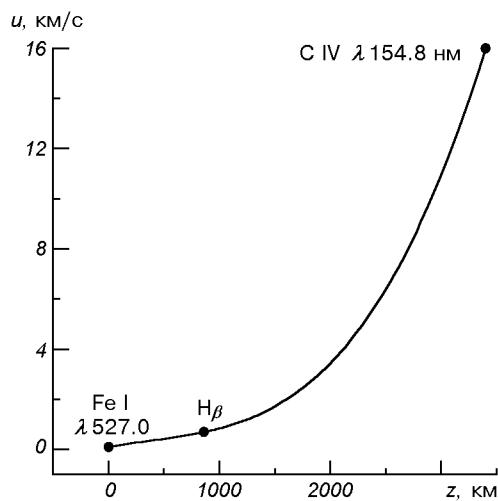


Рис. 1. Средние величины вертикальной скорости над тенью пятна в зависимости от высоты образования линий. Сплошной линией проведен полином третьей степени

$$\frac{S}{S_0} = \left(1 + \frac{z}{r_0} \operatorname{tg}\alpha\right)^2, \quad (1)$$

$$\rho u S = \rho_0 u_0 S_0 = \text{const}, \quad (2)$$

$$\rho u \frac{du}{dz} + \frac{dP}{dz} + \rho g = f(z), \quad (3)$$

$$\rho u \left(u \frac{du}{dz} + C_p \frac{dT}{dz} \right) = A(z), \quad (4)$$

$$P = R\rho T. \quad (5)$$

Выражение (1) — уравнение магнитной силовой трубы ($S = \pi r^2$ — сечение трубы тока на высоте z , высота отсчитывается от основания трубы тока, α — угол раствора силовых линий в трубке тока, принят не изменяющимся с высотой; r_0 — радиус сечения в основании магнитной трубы). Уравнение (2) выражает постоянство расхода массы вдоль трубы тока (ρ , u — плотность и скорость плазмы). Уравнение (3) — уравнение движения (P — давление плазмы; g — ускорение силы тяжести; $f(z)$ — сила внешнего поля). Уравнение (4) представляет изменение плотности потока энергии (C_p — удельная теплоемкость плазмы при постоянном давлении; T — температура; $A(z)$ — плотность подводимой извне энергии в единицу времени). Уравнение (5) — уравнение состояния идеального газа (R — газовая постоянная). Индекс «0» относится к пара-

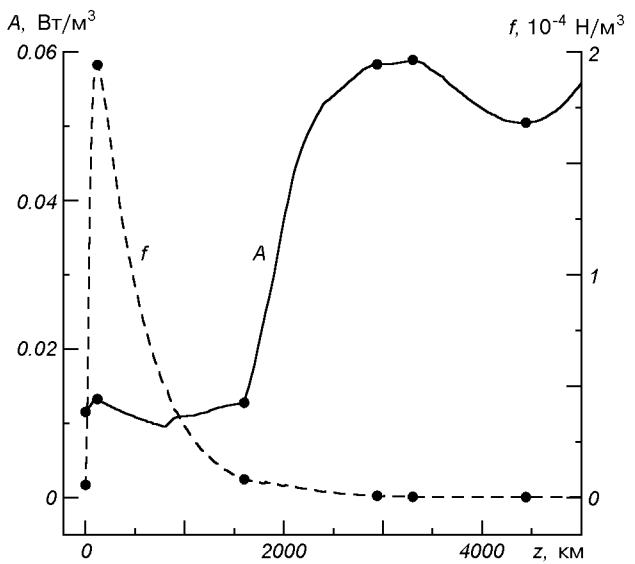


Рис. 2. Изменение функций $A(z)$ и $f(z)$ с высотой z

метрам в основании трубы тока.

Скорость течения плазмы (рис. 1) известна в каждой точке z трубы тока, которая совпадает с магнитной силовой трубкой (выражение (1)). Все параметры течения зависят только от одной координаты z . На высоте $z = 0$ радиус магнитной трубы $r_0 = 1000$ км. Средний по тени пятна угол раствора силовых линий $\alpha = 30^\circ$ [2]. В качестве нулевого приближения взята гидростатическая модель тени пятна [7].

На основании уравнений (1)–(5), данных рис. 1 и модели тени пятна были вычислены [4]:

$$A(z) = \rho_0 u_0 \frac{S_0}{S} \frac{d}{dz} \left(\frac{u^2}{2} + C_p T \right), \quad (6)$$

и

$$f(z) = \rho \frac{d}{dz} \left(\frac{u^2}{2} + gz \right) + \frac{dP}{dz}, \quad (7)$$

где dP/dz вычислена на основании модели тени пятна.

Результаты вычислений $A(z)$ и $f(z)$ приведены на рис. 2. Вычисления были продолжены до высоты $z = 5000$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для того чтобы происходило наблюдаемое увеличение скорости плазмы от начального значения 0.10 км/с до 16 км/с и нагрев плазмы от 3500 К до 10^5 К, сила, действующая на плазму со стороны внешнего поля, должна иметь вид, близкий к импульльному — достигнуть максимального значения $f(z) \approx 1.87 \cdot 10^{-4}$ Н/м³ на высоте $z = 120$ км и затем плавно спадать (почти по экспоненте). При этом плотность подводимого потока энергии в единицу времени $A(z)$ должна оставаться почти постоянной на расстоянии от $z = 0$ до $z = 1600$ км и равной примерно $1.15 \cdot 10^{-2}$ Вт/м³. При больших значениях высоты $A(z)$ должна увеличиваться примерно до $5.2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м³ ($z = 3300$ км), а затем должно происходить ее медленное уменьшение до $4.39 \cdot 10^{-2}$ Вт/м³ ($z = 4440$ км) (рис. 2). Такие изменения силы внешнего поля и подвода энергии к плазме могут обеспечить наблюдаемое изменение скорости плазмы и роста температуры ее с высотой.

Скорость течения плазмы достигает звуковой скорости, равной примерно 44 км/с на высоте $z = 4730$ км. При больших z и при данных $A(z)$ и $f(z)$ течение становится сверхзвуковым.

Ускорение и нагрев плазмы могут быть обусловлены как электромагнитным полем, так и полем

акустических колебаний, распространяющихся вдоль магнитного поля, которое практически вертикально в тени пятна. Интенсивность акустических колебаний довольно высокая [8]. Возможна трансформация акустических волн в другие виды.

В процессе нагрева происходит ионизация водорода и гелия, которая при расчетах не учитывалась. Плотность тепловой энергии плазмы над тенью пятна сравнима с энергией, необходимой для нагрева невозмущенной хромосферы в переходной области хромосфера — корона [16]. Как мы видим, проблема нагрева является общей для хромосферы, как над пятном, так и над невозмущенными областями и требуют отдельных исследований.

Отметим, что в случае, если магнитная трубка простирается вертикально вверх на достаточно большую величину, этот механизм может приводить к ускорению плазмы до скоростей и температур плазмы солнечного ветра.

1. Гопасюк О. С. Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. II. Наблюдения в линии H_β // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 5.—С. 413—420.
2. Гопасюк О. С. Движения плазмы над тенью солнечного пятна вблизи уровня фотосфера—хромосфера. Структура магнитного поля // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 3.—С. 230—240.
3. Гопасюк О. С., Гопасюк С. И. О движении плазмы в области температурного минимума — фотосфера над тенью пятен // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 2.—С. 161—170.
4. Гопасюк С. И., Гопасюк О. С. К проблеме движений плазмы в хромосфере и переходной области над тенью пятен // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 4.—С. 341—350.
5. Alissandrakis C. E., Dialetis D., Mein P. et al. The Evershed flow in the solar photosphere, chromosphere and chromosphere — corona transition region // Proc. 10th European Regional Astronomy Meeting of the IAU. The Sun / Eds L. Hejna, M. Sobotka. — 1987.—Vol. 1.—P. 147—151.
6. Athey R. G., Gurman J. B., Shine R. A., Henze W. Fluid motions in the solar chromosphere — corona transition region. III. Active region flows from wide slit dopplergrams // Astrophys. J.—1983.—269, N 2.—P. 706—714.
7. Avrett E. H. Reference model atmosphere calculation — The Sunspot sunspot model // The Physics of Sunspots / Eds L. E. Cram, J. H. Thomas. — Sacramento Peak Obs., 1981.—P. 235—257.
8. Beckers J. M., Tallant P. E. Cromospheric inhomogeneities in sunspot umbrae // Solar Phys.—1969.—7, N 3.—P. 351—365.
9. Hagyard M. J., Teuber D., West E. A., et al. Vertical gradients of sunspot magnetic fields // Solar Phys.—1983.—84, N 1/2.—P. 13—31.
10. Jordan C. The ionization equilibrium of elements between carbon and nickel // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1969.—142.—P. 501—521.
11. Kingston A. E., Doyle J. G., Dufton P. L., Gurman J. B. An emission measure analysis of two sunspots observed by the UVSP instrument on the SMM spacecraft // Solar Phys.—1982.—81, N 1.—P. 47—58.
12. Lites B. W. Steady flows in the chromosphere and transition

- zone above active regions as observed by OSO. 8 // Solar Phys.—1980.—**68**, N 2.—P. 327—337.
13. Mattig W. Über die Chromosphäre der Sonnenflecken // Z. Astrophys.—1962.—**56**, N 3.—P. 161—180.
 14. Mattig W. Geometrical height-scale and the pressure equilibrium in the sunspot umbra // Solar Phys.—1969.—**8**, N 2.—P. 291—309.
 15. Mein P., Simon G., Vial J. C., Shine R. A. Mass motions in the solar chromosphere and transition zone // Astron. and Astrophys.—1982.—**111**, N 1.—P. 136—139.
 16. Nicolas K. R., Kjeldseth-Moe O., Bartoe J. D. F., Bruecner G. E. High resolution EUV structure of the chromosphere — corona transition region above a sunspot // Solar Phys.—1982.—**81**, N 2.—P. 253—280.

PLASMA MOTIONS ABOVE THE TEMPERATURE MINIMUM REGION

S. I. Gopasyuk, O. S. Gopasyuk

Above umbra of some sunspots, plasma can be accelerated from 0.1 km/s above the temperature minimum region up to 16—20 km/s in the chromosphere — corona transition region. Moving plasma gets warm from 3500 K in the temperature minimum region up to 10^5 K in the region of the C IV λ 154.8 nm line formation. Such variation of the plasma velocity and temperature with height is possible under the effect of an external field. The force and energy magnitudes required for creating the observed velocity and temperature of the plasma are determined.

УДК 523.98

А. В. Степанов¹, Ю. Т. Цап²

¹Головна астрономічна обсерваторія РАН, Санкт-Петербург, Росія

²НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», с. Наукове, Крим

Сравнительный анализ конусных неустойчивостей в коронах Солнца и звезд

У наближенні «холодної» фонової плазми розглядається збудження анізотропними електронами електромагнітних і електростатичних хвиль. Показано, що в коронах Сонця і зірок найефективніше збуджуються свисти. Результати роботи можна використати для діагностики спалахової плазми.

ВВЕДЕНИЕ

При интерпретации многих нетепловых вспышечных явлений, наблюдаемых в коронах Солнца и некоторых звезд, довольно часто привлекается модель коронального пробкотрона [3, 5]. Суть ее состоит в том, что вспышечная петля представляется в виде магнитной ловушки, в которую «впрыскиваются» нетепловые электроны. Часть частиц, у которых угол α между направлением магнитного поля B и вектором скорости v (pitch-угол) больше некоторого критического значения α_0 , становится «захваченной». Частицы с $\alpha < \alpha_0$ покидают магнитную ловушку и попадают в плотные слои атмосферы, где полностью теряют свою энергию из-за столкновений. В результате распределение энергичных электронов, заполняющих ловушку, становится анизотропным, что может привести к раскачке различных колебаний и волн, вызывающих диффузию захваченных частиц в конус потерь [5]. Если плазменная частота ω_e превышает гирочастоту электронов ω_c , то в условиях корон Солнца и звезд наиболее эффективно возбуждаются свисты и электростатические волны [4]. Между тем вопрос о том, какие моды определяют диффузию как нерелятивистских, так и особенно релятивистских частиц по-прежнему остается до конца не выясненным.

Сравнительно недавно благодаря микроволновым наблюдениям, выполненным с высоким пространственным разрешением ($< 10''$) на радиогелиографе Нобеутама (17 и 34 ГГц), впервые удалось обнару-

жить распространение фронта энергичных электронов вдоль вспышечной петли [6]. Скорость продвижения фронта оказалась приблизительно в 30 раз меньше скорости света с. Поскольку высокочастотное микроволновое излучение солнечных вспышек определяется электронами релятивистских энергий, то возникает вопрос о природе столь необычного явления.

Наиболее аргументированной представляется гипотеза, в соответствии с которой за низкую скорость фронта энергичных электронов ответственны плазменные колебания и волны [6]. Они способны вызвать эффективное рассеяние частиц, которое будет препятствовать их свободному распространению вдоль магнитного поля. Это предполагает необходимость детального исследования инкрементов кинетических неустойчивостей для различных плазменных мод, возбуждаемых неравновесными электронами.

Цель представленной работы — провести сравнительный анализ инкрементов, связанных с возбуждением свистов и электростатических волн анизотропными электронами различных энергий в корональных арках.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Исходный вид функции распределения энергичных электронов задавался в виде

$$f(p, \alpha) = D p^{-\beta} \theta(\alpha - \alpha_0), \quad (1)$$

где $\theta(\alpha)$ — функция Хэвисайда. Основное достоинство данного распределения состоит в том, что оно позволяет существенно расширить рамки применимости аналитических методов исследования даже в том случае, когда импульс электронов p ограничен снизу некоторой предельной величиной p_{\min} .

При проведении расчетов инкрементов, связанных с возбуждением свистов и электростатических волн, за основу брались соотношения, полученные в приближении «холодной» фоновой плазмы:

$$\Gamma_w = A_w \sum_{l=\pm 1} \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{\hat{K}_w f}{\tilde{m}^2} \delta \left(\omega - l\tilde{\omega}_c - \frac{kpcos\alpha}{\tilde{m}} \right) p^3 \sin^2 \alpha dp d\alpha \quad (2)$$

$$\Gamma_p = A_p \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \hat{K}_p \delta \left(\omega - l\tilde{\omega}_c - \frac{kpcos\varphi cos\alpha}{\tilde{m}} \right) J_l^2 \left(\frac{kpsin\varphi sin\alpha}{\tilde{m}\tilde{\omega}_c} \right) pdp d\alpha. \quad (3)$$

Здесь φ — угол между направлением магнитного поля и волновым вектором, $\tilde{m} = \sqrt{m^2 + (p/c)^2}$, $\tilde{\omega}_c = eB/(\tilde{m}c)$ — соответственно релятивистская масса и гирочастота электрона,

$$A_w = 4\pi^3 e^2 \left(2N^2 \omega + \frac{\omega_e^2 (2\omega - \omega_c)}{(\omega - \omega_c)^2} \right)^{-1},$$

$$N^2 = 1 + \frac{\omega_e^2}{\omega(\omega_c - \omega)},$$

$$A_p = \frac{4\pi^3 e^2}{k^2 \omega_e^2} \left(\frac{\omega}{(\omega^2 - \omega_c^2)^2} \cos^2 \varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{\omega^3} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\hat{K}_w = \left(\frac{\tilde{m}\omega}{p} \cos\alpha - k \right) \frac{\partial}{\partial \alpha} + \tilde{m}\omega \sin\alpha \frac{\partial}{\partial p},$$

$$\hat{K}_p = \left(\frac{\tilde{m}\omega}{p} \cos\alpha - k \cos\varphi \right) \frac{\partial}{\partial \alpha} + \tilde{m}\omega \sin\alpha \frac{\partial}{\partial p}.$$

Также заметим, что при получении формулы (2) учитывались только продольные электромагнитные волны ($\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}$).

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением двух предельных случаев нерелятивистских, $((mc)^2 \gg p^2)$, и релятивистских $((mc)^2 \ll p^2)$ электронов. При этом из условия резонанса

$$\omega - l\tilde{\omega}_c - kvcos\varphi cos\alpha = 0,$$

следует, что в нерелятивистском случае можно пренебречь релятивистскими поправками, если

$$\cos\varphi cos\alpha \gg \frac{l\omega_c v}{2kc^2}.$$

В свою очередь, релятивистское приближение предполагает $\tilde{m} = \sqrt{m^2 + (p/c)^2} \approx p/c$ и $\gamma^2 =$

$= 1/(1 - v^2/c^2) \gg 2$. Для $\gamma = 3$ кинетическая энергия $E = (\gamma - 1)mc^2 \approx 1$ МэВ соответствует электронам, которые дают основной вклад в высокочастотное гиросинхротронное излучение солнечных и звездных вспышек [2].

НЕРЕЛЯТИВИСТСКИЙ СЛУЧАЙ

Если считать частоту свистов $\omega \ll \omega_c$, а также пренебречь аномальным эффектом Доплера ($l = -1$), то из (1), (2) и (4) получим

$$\begin{aligned} \Gamma_w^n &\approx -A_w^0 D \frac{k}{|k|} \frac{\sin^2 \alpha_0}{|\cos \alpha_0|} v_0^{1-\beta} \Bigg|_{v_0} = \left| \frac{\omega_c}{k \cos \alpha_0} \right|, \\ A_w^0 &= \frac{4\pi^3 e^2}{m} \frac{\omega_c}{\omega_e^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), раскачиваться могут только такие волны, у которых $\cos\varphi < 0$, и в силу условия резонанса за их генерацию должны быть ответственны частицы с $\cos\alpha > 0$.

Предположим, что разница между плазменной частотой и гирочастотой электронов не слишком велика ($\omega_e/\omega_c < 3\dots 5$), а показатель спектра $\beta \gg 1$. В этом случае значение инкремента (3) будет определяться членом ряда, у которого величина расстройки $|\omega - l\omega_c|$ окажется минимальной. Тогда, как нетрудно показать, из (1) и (3) следует

$$\Gamma_p^n \approx \frac{A_p^0 D}{|\cos \alpha_0|} J_1^2 \left(\frac{kvsin\varphi sin\alpha_0}{\omega_c} \right) v_0^{1-\beta} \Bigg|_{v_0} = \left| \frac{\omega - l\omega_c}{k \cos \varphi \cos \alpha_0} \right|. \quad (6)$$

Когда $\omega_e^2 \gg \omega_c^2$, дисперсионные уравнения для электростатических волн верхнегибридной и нижнегибридной частоты соответственно принимают вид

$$\omega_{uh} = \omega_e + \frac{\omega_c^2}{2\omega_e} \sin^2 \varphi, \quad \omega_{lh} = \omega_c \cos \varphi,$$

откуда с учетом (4) находим

$$A_{uh}^0 = \frac{4\pi^3 e^2 \omega_e}{mk^2}, \quad A_{lh}^0 = \frac{4\pi^3 e^2}{mk^2} \frac{\omega_c^2}{\omega_e^2} \cos \varphi. \quad (7)$$

Полагая для электростатических волн $k \sim 3\omega_e/c$ [6], согласно (5)—(7) получим

$$\frac{\Gamma_{uh}^n}{\Gamma_{lh}^n} \sim \left(\frac{\omega_e}{\omega_c} \right)^3 \frac{1}{\cos \varphi}, \quad (8)$$

$$\frac{\Gamma_{uh}^n}{\Gamma_{lh}^n} \sim 10 \left(\frac{v_0}{c} \right)^2 \frac{\omega_c}{\omega_e} \frac{\sin^2 \alpha_0}{J_1^2 \left(3 \frac{\omega_e v}{\omega_c c} \sin \varphi \sin \alpha_0 \right)}. \quad (9)$$

Из уравнения (8) следует, что верхнегибридные

волны возбуждаются значительно эффективней низнегибридных, поскольку $\omega_e^2 \gg \omega_c^2$. В свою очередь, положив $v/c \approx 0.3$, $\omega_e/\omega_c \approx 3$, $\alpha_0 \approx 20^\circ$, $l = 3$, из (9) находим $\Gamma_w^r/\Gamma_{uh}^r \sim 10$, что свидетельствует о преобладании инкремента свистов.

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ СЛУЧАЙ

Для высокоэнергичных электронов, $p^2 \gg (mc)^2$, уравнения (2) и (3) сводятся к виду

$$\begin{aligned} \Gamma_w^r &= \\ &= A_w mc^2 \sum_{l=\pm 1}^{\infty} \int_0^{\pi} \int_{p_{min}}^{\infty} \hat{K}_w f \delta(p(\omega - kpcos\alpha) - leB) p^2 \sin^2 \alpha dp d\alpha, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_p^r &= \\ &= A_p \frac{m}{c} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\pi} \int_{p_{min}}^{\infty} \hat{K}_p f \delta[p(\omega - kpcos\alpha) - leB] J_l^2 \left(\frac{kpcos\varphi sin\alpha}{eB} \right) p^2 dp d\alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (1) в (10) и (11) и поступая так же, как и в предыдущем разделе, после простых, но громоздких преобразований получим

$$\Gamma_w^r \approx A_w^0 D m c \sin^2 \alpha_0 p_0^2 - \beta \left| p_0 = \left| \frac{eB}{\omega - kccos\alpha_0} \right| \right., \quad (12)$$

$$\Gamma_p^r \approx A_p^0 D \frac{m}{c} J_l^2 \left(\frac{kpcos\varphi sin\alpha_0}{eB} \right) p_0^2 - \beta \left| p_0 = \left| \frac{leB}{\omega - kccos\varphi cos\alpha_0} \right| \right.. \quad (13)$$

Принимая во внимание (5), (7), (12) и (13), нетрудно заключить, что в релятивистском случае, как и в нерелятивистском, верхнегибридные моды возбуждаются более эффективно, чем низнегибридные, причем

$$\frac{\Gamma_w^r}{\Gamma_{uh}^r} \propto 10 \frac{\omega_c}{\omega_e} \frac{\sin^2 \alpha_0}{J_l^2 \left(3 \frac{\omega_e}{\omega_c} \sin \varphi \sin \alpha_0 \right)}. \quad (14)$$

Уравнения (9) и (14) предполагают следующие соотношения между инкрементами для нерелятивистских и релятивистских электронов

$$\frac{\Gamma_w^r}{\Gamma_{uh}^r} / \frac{\Gamma_w^n}{\Gamma_{uh}^n} \sim \left(\frac{c}{v_0} \right)^2. \quad (15)$$

Как следует из уравнения (15), в релятивистском случае роль свистов в диффузии энергичных электронов становится еще более существенной.

ВЫВОДЫ

В представленной работе мы провели сравнительный анализ инкрементов кинетических неустойчивостей, связанных с возбуждением свистов и электростатических мод анизотропными электронами. Применительно к коронам Солнца и звезд нами были получены следующие основные результаты.

1. Как в релятивистском, так и в нерелятивистском случае наиболее эффективно возбуждаются свисты.

2. Значения инкрементов для верхнегибридных волн превышают соответствующие значения инкрементов для низнегибридных.

3. Скорость раскачки свистов в релятивистском случае больше, чем в нерелятивистском приблизительно в $(c/v_0)^2$ раз.

Отметим, что если диффузия анизотропных релятивистских электронов определяется свистами, то они будут распространяться в корональных арках со скоростью, близкой к альфвеновской. Следовательно, результаты данной работы могут быть использованы для диагностики вспышечной плазмы.

Работа поддержана грантом ИНТАС № 00-543 и частично грантом РФФИ № 03-02-17218.

1. Цытович В. Н. Теория турбулентной плазмы. — М.: Атомиздат, 1971.—423 с.
2. Bastian T. S. Solar physics with radio observations // Proc. of the Nobeyama Symp. / Eds T. Bastian, N. Gopalswamy, K. Shibasaki. — Kiyosato, Japan, 1998.—P. 211—221.
3. Melrose D. B., Brown J. C. Precipitation in trap models for solar hard X-ray bursts // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1976.—176, N 1.—P. 15—30.
4. Sharma R. R., Vlahos L. Comparative study of the loss cone-driven instabilities in the low solar corona // Astrophys. J.—1984.—280, N 1.—P. 405—415.
5. Stepanov A. V., Tsap Yu. T. Electron-whistler interaction in coronal loops and radiation signatures // Solar Phys.—2002.—211, N 1.—P. 135—154.
6. Yokoyama T., Nakajima H., Shibasaki K., et al. Microwave observations of the rapid propagation of nonthermal sources in a solar flare by the Nobeyama Radioheliograph // Astrophys. J.—2002.—576, N 1.—P. L87—L90.

COMPARATIVE ANALYSIS OF LOSS-CONE INSTABILITIES IN THE CORONAE OF THE SUN AND STARS

A. V. Stepanov, Yu. T. Tsap

In a cold plasma approximation the excitation of electromagnetic and electrostatic waves by anisotropic electrons is considered. It was shown that whistlers are excited in the coronae of the Sun and stars most effectively. Results of this work may be used for the flare plasma diagnostics.

УДК 523.9-377

В. Н. Криводубський

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Проблемы солнечного динамо-цикла

Подано результати досліджень, спрямованих на подолання деяких утруднень теорії сонячного турбулентного динамо. Врахування магнітного пригнічення α -ефекту і новітніх даних геліосейсмології розширяє можливості механізму $\alpha\Omega$ -динамо при поясненні спостережених закономірностей і аномалій сонячної циклічності. Включення ефектів «магнітної антиплавучості» до моделі турбулентної перебудови глобального магнетизму дозволяє знати обмеження на величину тороїдального поля, збуджуваного Ω -ефектом поблизу дна конвективної зони. Розрахований в нелінійному наближенні період динамо-хвилі Паркера за порядком величини узгоджується зі спостереженою тривалістю сонячного циклу. Залучення до динамо-процесу результатів останніх геліосейсмічних вимірювань внутрішнього обертання приводить до північно-південної асиметрії меридіонального поля. У висок широтних ділянках конвективної зони в структурі меридіонального поля домінує квадрупольна мода, що надає можливість пояснити спостережену поблизу максимумів сонячних циклів магнітну аномалію (гадану «монопольність») глобального поля.

Первооткрыватель 11-летних циклов солнечных пятен Р. Вольф считал, что причина их цикличности состоит в гравитационном (приливном) действии планет на Солнце. Однако все поиски в этом направлении способствовали в большей мере развитию математики, чем установлению конкретных механизмов солнечной активности. Со временем возрастала уверенность, что цикличность обусловлена физическими процессами на самом Солнце. После того как все наблюдавшие проявления солнечной активности все больше указывали на их связь с магнитными полями, стало ясно, что именно последние управляет циклом.

Согласно современным представлениям [2, 12, 13] глобальное осесимметричное магнитное поле Солнца \mathbf{B} состоит из двух компонентов: спрятанного в глубинах сильного тороидального (азимутального) поля B_t , которое, прорываясь в некоторых местах благодаря магнитной плавучести на поверхность, определяет интенсивность пятнообразования, и слабого полоидального (меридионального) поля B_p , силовые линии которого, выходя на солнечную поверхность, очевидно, формируют фоновые, в частности полярные, магнитные поля. Полный период смены магнитного знака биполярных групп пятен вмещает два 11-летних цикла пятен

(магнитный цикл Хейла). Околополярное поле также изменяется с периодом около 22 лет, достигая максимальных значений в эпохи минимумов активности пятен, и изменяет свой знак вблизи эпох максимумов пятен. Таким образом, наблюдаемые закономерности солнечного магнетизма свидетельствуют, что обе составляющие глобального поля связаны друг с другом, изменяются во времени в противофазе со средним периодом около 22 лет и, очевидно, генерируются одним механизмом, а сам процесс генерации имеет колебательный (периодический) характер.

Наибольшего распространения среди исследователей получили представления, что пусковым механизмом солнечного цикла служит турбулентное динамо [2, 12, 13]. Ключевую роль в современной теории динамо играет α -эффект [5], суть которого состоит в возможности возбуждения в плазме с зеркально-несимметричными (спиральными) движениями электродвижущей силы $\varepsilon_{gen} = \alpha \langle \mathbf{B} \rangle / c$, параллельной усредненному магнитному полю $\langle \mathbf{B} \rangle$ (α — параметр спиральности турбулентных движений, c — скорость света, угловые скобки обозначают усреднение по масштабам, значительно превышающим размеры турбулентных пульсаций). Для возникновения спиральности необходимо, чтобы в

поле турбулентных скоростей \mathbf{v} усредненное значение корреляции $\langle \mathbf{v} \cdot \text{rot} \mathbf{v} \rangle$ на больших расстояниях отличалось от нуля и имело какой-то определенный знак. Величина параметра спиральности определяется выражением [2, 5]

$$\alpha \approx -\frac{\tau}{3} \langle \mathbf{v} \cdot \text{rot} \mathbf{v} \rangle \approx -\frac{2}{3} \Omega l^2 \nabla \ln(\rho v) = \\ = -\frac{2}{3} \Omega l^2 \left(\frac{\nabla \rho}{\rho} + \frac{\nabla v}{v} \right), \quad (1)$$

где τ и l — характерное время и средняя длина перемешивания турбулентных пульсаций, $v = \langle \mathbf{v}^2 \rangle^{1/2}$ — средняя квадратичная турбулентная скорость, Ω — угловая скорость, ρ — плотность плазмы, $\nabla \equiv \partial / \partial r$ — радиальный градиент.

Благоприятные условия для формирования спирального поля скоростей создаются в конвективной зоне (КЗ) Солнца, где существует сильный вертикальный градиент плотности потока (ρv). В результате взаимодействия вращения и конвекции в КЗ формируется специфическая комбинация дифференциального вращения (крупномасштабная составляющая поля скоростей) и спиральной турбулизированной конвекции (мелкомасштабная составляющая). Дифференциальное вращение, действуя на полоидальное поле \mathbf{B}_p , возбуждает тороидальную составляющую \mathbf{B}_t (Ω -эффект), тогда как спиральная конвекция регенерирует из этого поля полоидальную составляющую \mathbf{B}_p (α -эффект). Именно α -эффект довольно просто замыкает солнечный динамо-цикл, поскольку он обеспечивает в каждом текущем цикле генерацию нового полоидального поля, противоположного направления по отношению к его ориентации в предыдущем цикле. В случае, когда генерация и диссиляция магнитных потоков уравновешены, получают циклическую $\alpha\Omega$ -динамо модель, которую можно описать системой уравнений [5, 13]

$$\partial \mathbf{A} / \partial t = \alpha \mathbf{B}_t + D_t \Delta \mathbf{A}, \quad (2)$$

$$\partial \mathbf{B}_t / \partial t = r \sin \theta (\mathbf{B}_p \nabla) \Omega \mathbf{i}_\phi + D_t \Delta \mathbf{B}_t, \quad (3)$$

где $\mathbf{A} = A \mathbf{i}_\phi$ — тороидальный векторный потенциал ($\mathbf{B}_p = \text{rot} \mathbf{A}$), r , θ и \mathbf{i}_ϕ — соответственно радиус, полярный угол и азимутальный единичный вектор в сферической системе координат, $D_t = \nu_t + \nu_m$ — коэффициент турбулентной магнитной диффузии, $\nu_t \approx (1/3)vl$ и $\nu_m = c^2/(4\pi\sigma)$ — турбулентная и магнитная вязкости, σ — газокинетическая проводимость плазмы.

Согласно Е. Паркеру [13] решение системы уравнений динамо (2)–(3), описывающих эволю-

цию магнитных компонентов \mathbf{B}_t и \mathbf{B}_p в пространстве и времени, можно представить в виде мигрирующих волн типа $\text{Sech}[\omega t - i(qKr)] \exp[i(k\theta \pm \omega t)]$, названных Паркером динамо-волнами (ω — частота динамо-волны, $q = k/K$, K — волновое число динамо-волны, k — обычное волновое число). Направление меридиональной миграции динамо-волн (к экватору или к полюсам) зависит от знака (отрицательного или положительного) произведения $\alpha \cdot \partial \Omega / \partial r$. Период динамо-волны T определяется интенсивностью α -эффекта и величиной радиального градиента угловой скорости $\partial \Omega / \partial r$ в КЗ

$$T = 2\pi / \omega = 2\pi / [(1/2) \sin \theta |\alpha G| k]^{1/2} \approx \\ \approx 2\pi / [(1/2) \sin \theta |\alpha \cdot \partial \Omega / \partial r| \cdot (r/\lambda)]^{1/2} \quad (4)$$

($G \equiv r \partial \Omega / \partial r$ — мера радиального дифференциального вращения, $\lambda \approx 1/k$ — меридиональная протяженность области динамо при модельных расчетах). В модели $\alpha\Omega$ -динамо параметр T играет роль периода динамо-цикла.

Структура глобального поля зависит от знака и величины динамо-числа

$$K\lambda = (\alpha G \lambda^3 / \nu_t^2)^{1/3}, \quad (5)$$

которое характеризует эффективность динамо-процесса. При отрицательных значениях числа $K\lambda$ первой возбуждается основная нечетная мода поля — диполь, которая согласно модельных расчетов Паркера [13] требует $K\lambda = -7.43$; тогда как для возбуждения четной моды — квадруполья необходимо $K\lambda = -9.10$. В случае же положительных волновых динамо-чисел в генерируемом поле доминирующей будет квадрупольная мода, поскольку для ее возбуждения необходимо меньшее значение $K\lambda = +7.43$, чем для диполя ($K\lambda = +9.10$).

На основании механизма $\alpha\Omega$ -динамо исследователям удалось достичь значительных успехов в объяснении наблюдаемых закономерностей солнечной цикличности (см. обзор [22]). Однако еще осталось несколько серьезных затруднений теории солнечного динамо. В первую очередь это проблемы удержания сильных полей в области генерации, объяснения периода цикла и наблюданной северо-южной магнитной аномалии во время переполюсовки полярного поля в эпохи максимумов солнечных циклов. Суть проблем такова.

1. Для эффективного Ω -процесса необходимо, чтобы магнитные силовые трубы достаточно долго оставались в области генерации. Однако вследствие быстрого всплытия полей трудно обеспечить значительное их усиление. Как известно, паркеровская скорость всплытия поля V_B сравнима с

альвеновской скоростью c_a : $V_B(B) \approx c_a = B/(4\pi\rho)^{1/2}$. В таком случае эффективность всплыvания наибольшая вблизи солнечной поверхности и значительно меньше в глубоких плотных слоях. Именно это является одной из основных причин, почему исследователи считают плотные слои вблизи нижнего основания КЗ наиболее благоприятным местом для динамо-процесса. Тем не менее, даже на глубине 100 тыс. км скорость подъема поля величиной 10 мТл составляет около 1 м/с, что приводит к быстрому его всплыvанию на поверхность (всего за три года). Таким образом, вследствие всплыvания трудно удерживать сильное магнитное поле в зоне генерации в течение времени, сравнимого с длительностью солнечного цикла. Это приводит к ограничению на величину торoidalного поля, возбуждаемого Ω -эффектом [13]. Поэтому возникает необходимость поиска механизмов «магнитной антиплавучести», способных компенсировать потери магнитного потока в зоне генерации.

2. Проведенные с помощью формулы (4) расчеты периода динамо-волны на основании физических параметров моделей КЗ в кинематическом приближении дают оценку около одного года [2, 14], что значительно меньше наблюдаемой продолжительности солнечного цикла. Полученные заниженные оценки периода T , по-видимому, обусловлены тем, что при расчетах были использованы завышенные значения параметров α и $\partial\Omega/\partial r$. Поэтому решение проблемы следует искать в нелинейной постановке задачи о циклическом динамо-процессе. Очевидно, что учет самоиндукции приведет к заметному понижению сенситивного параметра спиральности. Что же касается параметра $\partial\Omega/\partial r$, то вряд ли магнитное поле в состоянии существенно повлиять на регулярное поле скоростей $\Omega(r, \theta)$, поскольку плотность магнитной энергии возбуждаемого поля значительно меньше кинетической энергии вращения. Тем не менее, ощутимое уменьшение величины $\partial\Omega/\partial r$ можно получить за счет более надежных в последние годы его определений из расшифровки гелиосейсмологических данных, в том числе полученных с помощью инструментов на космическом аппарате SOHO (в последнее десятилетие при изучении внутреннего вращения Солнца исследователи обнаружили тенденцию к уменьшению этого гелиосейсмического параметра).

3. Магнитографические наблюдения поверхностных (фоновых), в частности полярных, магнитных структур свидетельствуют, что в большинстве случаев полоидальное поле можно описать диполем, антисимметричным по полярности относительно экваториальной плоскости. Однако во время последних пяти максимумов солнечной активности

реверсация полярностей северного и южного полярных полей, так называемая переполюсовка, происходила с интервалом 1-2 года. В результате оба магнитные полюса в этот период имели одинаковый знак. Создавалось впечатление, будто бы глобальному полю присуща структура «монополя» [4, 18]. Для объяснения такой наблюдаемой магнитной аномалии некоторые исследователи допускают, что в это время на Солнце доминировала магнитно-симметричная относительно экваториальной плоскости квадрупольная мода полоидального поля [12, 18]. Теория динамо обязана обосновать это предположение. Существенную помощь в решении проблемы должна оказать гелиосейсмология, которая открыла широкие возможности диагностики недр Солнца. Уверенность в успехе окрепла после того, как в результате последних гелиосейсмологических экспериментов [19, 20] были обнаружены различные режимы внутреннего вращения в экваториальной и околополюсных областях КЗ, а также вариации угловой скорости со временем (с фазой цикла).

Таким образом, усовершенствование моделей солнечного динамо-цикла с целью решения обсуждаемых проблем следует искать за счет включения в эти модели механизмов направленного вниз магнитного потока, нелинейных эффектов (самоиндукции) и привлечения результатов новейших гелиосейсмических измерений внутреннего вращения Солнца. На преодоление отмеченных затруднений теории солнечного динамо были направлены усилия автора в последние годы.

Ниже кратко приведены основные результаты этих исследований (во всех случаях при расчетах использовались физические характеристики подфотосферных слоев из модели КЗ Стикса [26]).

1. Удержание мощных магнитных полей в области генерации. В связи с проблемой магнитной плавучести особое внимание исследователей привлекает переходной слой на границе КЗ и радиативных недр, внутрь которого энергия передается конвекцией, а наружу — выносится радиацией. В литературе он получил название *слой проникающей конвекции* (*convective overshoot layer*) [23]. В этой области стратификация вещества слабо сверхадиабатична, что необходимо для противодействия магнитной плавучести. Тем не менее, даже здесь трудно удержать поля, сильнее 10 мТл [13]. Ограничения на величину поля были в значительной мере сняты после расчета эффекта магнитной плавучести в рамках теории усредненного магнитного поля [3].

Для дальнейшего согласования времени выноса на поверхность с длительностью цикла необходимо

принять во внимание эффекты направленной вниз турбулентной транспортировки горизонтального магнитного поля, которая не связана с движением среды как целого. Автор включил в схему перестройки тороидального поля два эффекта «магнитной антиплавучести». Наиболее изучен макроскопический турбулентный диамагнетизм — эффект направленного переноса магнитного поля, который возникает в неоднородном поле турбулентных скоростей (γ -эффект) [2]. Физический смысл турбулентного диамагнетизма состоит в вытеснение крупномасштабного магнитного поля вдоль градиента турбулентной вязкости $\nabla\nu_T$ (в направлении ее уменьшения) со скоростью $V_\mu = -\nabla\nu_T/2$. Поэтому вблизи дна КЗ и в overshoot-слое, где интенсивность турбулентной конвекции плавно уменьшается до нуля, турбулентный диамагнетизм действует против магнитной плавучести [6, 21]. В турбулентной среде возникает еще один направленный перенос магнитного поля, обусловленный переменностью плотности плазмы ρ ($\nabla\rho$ -эффект) [1, 17]. Неоднородность плотности в нелинейном режиме приводит к переносу поля вдоль градиента ρ со скоростью $V_\rho \approx (1/6) \cdot \tau v^2 \nabla \rho / \rho$. Поскольку на вертикальном протяжении КЗ имеет место сильнейший радиальный градиент плотности плазмы (величина ρ изменяется на 5-6 порядков величины), то здесь возникает весьма интенсивный магнитный поток в направлении нижнего основания КЗ [8, 9].

Проведенные автором модельные расчеты на основе условия баланса эффектов магнитного всплыния и опускания полей $\mathbf{V}_B(B) + \mathbf{V}_\mu(B) + \mathbf{V}_\rho = 0$ показали, что в глубинных слоях γ - и $\nabla\rho$ -эффекты успешно противодействуют магнитной плавучести [6, 8, 9, 21]. Направленная вниз магнитная накачка, обусловленная этими двумя эффектами, достаточно для удержания вблизи дна КЗ (области интенсивного Ω -эффекта) сильных тороидальных полей ($B \approx 0.3..0.4$ Тл) в течение времени, сравнимого с длительностью цикла.

2. Период динамо-цикла. При анализе динамо-процесса в нелинейном режиме необходимо учесть, что нарастающее магнитное поле B в первую очередь будет подавлять α -эффект, как наиболее упорядоченный и, в то же время, слабый по сравнению с Ω -эффектом. Согласно Л.Кичатинову и Г.Рюдигеру [24] магнитное подавление альфа-эффекта (альфа-квенчинг) можно описать выражением $\alpha(B) = \alpha_0 \Psi_\alpha(B)$, где α_0 — определяемый выражением (1) коэффициент спиральности в отсутствие поля, а $\Psi_\alpha(B)$ — квенчинг-функция. Как отмечено в предыдущем пункте, вследствие эффектов «магнитной антиплавучести» вблизи дна КЗ могут удерживать-

ся довольно мощные ($B \approx 0.3..0.4$ Тл) тороидальные поля. В проведенном нами исследовании [10] установлено, что поля такой интенсивности вызывают существенный альфа-квенчинг ($\Psi_\alpha(B) \approx 0.4$). Поэтому величина рассчитанного в нелинейном режиме параметра спиральности $\alpha(B) = \alpha_0 \Psi_\alpha(B)$ составляет примерно $-2 \cdot 10^2$ см/с, что более чем в два раза меньше кинематических оценок коэффициента α_0 [7, 14], которые использовались для определения периода динамо-волны раньше.

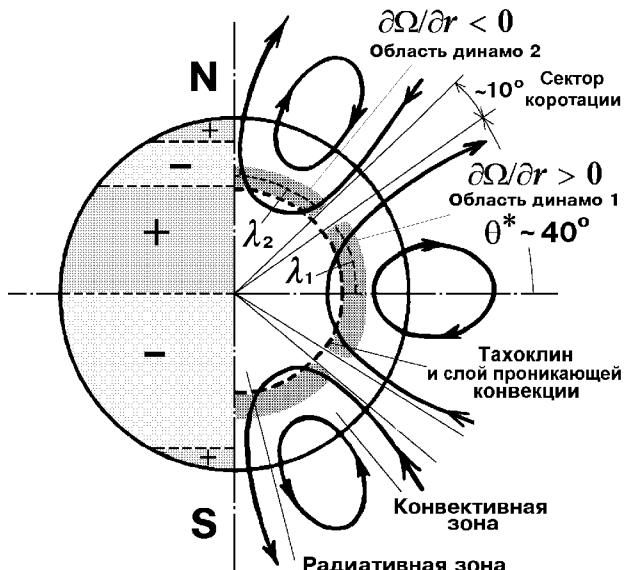
При определении $\partial\Omega/\partial r$ важно оперировать, как отмечалось, результатами последних гелиосеймических экспериментов. На основании данных измерений внутреннего вращения Солнца $\Omega(r, \theta)$ [19] автором были проведены расчеты радиальных градиентов угловой скорости $\partial\Omega/\partial r$ в различных участках КЗ [11]. Для серединной широтной плоскости 20° приэкваториального домена быстрого вращения (которая соответствует примерно середине «королевской зоны» пятен на солнечной поверхности) получена оценка $\partial\Omega/\partial r \approx 6 \cdot 10^{-18}$ рад/с·см.

В результате рассчитанный с новыми значениями параметров период динамо-цикла удлиняется (по сравнению с его значительно меньшими кинематическими оценками) до семи лет [11], что по порядку величины хорошо согласуется с наблюдаемой протяженностью солнечного цикла.

3. Северно-южная магнитная асимметрия. Данные последних гелиосеймических экспериментов вынуждают изменить установившиеся взгляды на картину внутреннего вращения Солнца. Две независимые группы исследователей вблизи максимума 23-го цикла активности (1995—2000 гг.) осуществили взаимно дополняющие друг друга гелиосеймологические эксперименты [19, 20]. Первая группа проводила наблюдения в рамках проекта наземной сети шести обсерваторий Global Oscillation Network Group (GONG), а вторая — с помощью инструмента Michelson Doppler Imager на борту космической станции SOHO. В результате решения обратной задачи вращательного расщепления частот акустических и гравитационных (p - и f -мод) глобальных колебаний было установлено, что характер внутреннего вращения Солнца сильно изменяется как с глубиной, так и с гелиоширотой. Поле угловой скорости $\Omega(r, \theta)$ в КЗ разделено на домены быстрого и медленного вращения с противоположными знаками радиального градиента угловой скорости. В приэкваториальном (низкоширотном) домене быстрого вращения угловая скорость в основном уменьшается с глубиной (т. е. увеличивается с увеличением радиуса — $\partial\Omega/\partial r > 0$), тогда как в околоволосных (высокоширотных) доменах

медленного вращения она, наоборот, возрастает внутрь Солнца ($\partial\Omega/\partial r < 0$). Непосредственно под нижнем основанием КЗ ($r \approx 0.71R_\odot$, R_\odot — радиус Солнца) в так называемом *тахоклине* [25] имеет место резкий переход от широтного дифференциального вращения КЗ к почти жесткому вращению радиативной зоны. Изменение характера дифференциального вращения происходит в относительно узкой широтной полосе $\theta^* \approx 40^\circ...50^\circ$ ($\theta^* = 90^\circ - \theta$) с постоянной угловой скоростью вдоль радиуса (секторе коротации), которая разделяет КЗ в каждом полушарии на два указанных домена быстрого и медленного вращения и через тахоклин смыкается с радиативной зоной. Следует ожидать, что в этих доменах с противоположными знаками $\partial\Omega/\partial r$ будут разными условиями относительно возбуждения глобальных мод гелиомагнитного поля.

Наиболее благоприятным местом для $\alpha\Omega$ -динамо исследователи считают слои вблизи дна КЗ. Как показано выше, в глубинных слоях турбулентные механизмы «антиплавучести» способствуют в течение длительного времени удержанию сильных полей. Наиболее эффективное противодействие магнитной плавучести, как отмечалось, достигается в слое проникающей конвекции [23]. Однако согласно гелиосеймическим измерениям [15] этот слой очень тонкий (толщина его составляет всего 3000—3500 км). Поэтому исследователи предполагают, что область динамо распространяется глубже и захватывает также тахоклин толщиной около 25 тыс. км [16]. В связи с этим на основании физических характеристик КЗ из модели Стикса [26] нами было исследовано две области динамо вблизи тахоклина [11]. Первая область локализована в приэкваториальном домене положительного (область динамо 1 — ОД1), а вторая — в околоволосных доменах отрицательного (область динамо 2 — ОД2) радиальных градиентов угловой скорости $\partial\Omega/\partial r$. Рассчитанное по формуле (5) значение волнового динамо-числа в ОД1 (меридиональная протяженность которой составляет $\lambda_1 \approx 3.6 \cdot 10^{10}$ см) равняется $K\lambda_1 \approx -7$ ($\alpha \approx -2 \cdot 10^2$ см/с, $\partial\Omega/\partial r \approx 6 \cdot 10^{-18}$ рад/с·см, $v_T \approx 3 \cdot 10^{12}$ см²/с), что близко к необходимому для возбуждения диполя значению $K\lambda = -7.43$. Поэтому на средних и низких широтах $\alpha\Omega$ -динамо будет генерировать в первую очередь основную, антисимметричную моду полоидального поля — диполь (рисунок, правая полусфера), которая мигрирует к экватору (поскольку $\alpha \cdot \partial\Omega/\partial r < 0$). На широтах θ^* выше 50° изменяется на противоположный знак радиального градиента угловой скорости ($\partial\Omega/\partial r \approx -8 \cdot 10^{-18}$ рад/с·см). В этом случае рассчитанное число $K\lambda_2$ в ОД2 ($\lambda_2 \approx 3.6 \cdot 10^{10}$ см)



Структура меридионального (полоидального) магнитного поля Солнца, рассчитанная на основе модели $\alpha\Omega$ -динамо с использованием данных гелиосеймологических экспериментов [19], проведенных вблизи эпохи максимума 23-го цикла. Правая полусфера. Магнитные силовые линии диполя ($\theta^* \leq | \pm 40^\circ |$, $\partial\Omega/\partial r > 0$, область динамо 1) и квадруполя ($\theta^* \geq | \pm 50^\circ |$, $\partial\Omega/\partial r < 0$, область динамо 2) (λ_1 и λ_2 — меридиональные протяженности ОД1 и ОД2). Низкоширотный и высокочиротный домены с противоположными знаками $\partial\Omega/\partial r$ разделены сектором коротации ($\partial\Omega/\partial r = 0$), который смыкается с почти жестко вращающейся радиативной зоной. Пунктирная линия соответствует нижнему основанию КЗ ($r \approx 0.71R_\odot$), глубже которого расположен тахоклин — тонкий слой толщиной около 25 тыс. км, где происходит резкий переход от широтного дифференциального вращения КЗ к почти жесткому вращению радиативной зоны. Непосредственно под КЗ локализован еще более тонкий (толщиной ≈ 3000 — 3500 км) слой проникающей конвекции, внутрь которого энергия переносится конвекцией, а наружу — выносится радиацией. Именно тахоклин и слой проникающей конвекции, а также прилегающие к ним самые глубинные слои КЗ, в которых в наибольшей мере проявляются эффекты «магнитной антиплавучести» (заштрихованная область) — наиболее благоприятное место для механизма $\alpha\Omega$ -динамо и удержания в течение длительного времени сильных полей в глубинах Солнца. Левая полусфера. Широтные зоны с положительной (+) и отрицательной (-) магнитными полярностями поверхностного (фонового) поля. Знаки ↔ и ↔ означают направление магнитных силовых линий соответственно от и до Солнца. Хорошо видна северо-южная асимметрия поверхностного поля, при этом оба полюса имеют одинаковый (+) знак поверхностного поля. Последнее позволяет объяснить наблюданную магнитную аномалию полярных полей — эффект кажущейся «монопольной» структуры меридионального поля в эпохи максимумов солнечных циклов

будет положительным ($\approx +8$). Ясно, что теперь в структуре меридионального поля преобладает квадруполь, для возбуждения которого достаточно $K\lambda = +7.43$.

В результате на схеме распределения магнитных полярностей поверхностного поля (рисунок, левая полусфера) в одной полусфере, например северной, обнаруживается три, а в южной — две широтные зоны перемежающихся магнитных знаков (полярностей). Чрезвычайно важно, что в картине поверхностного магнетизма, полученной в результате суперпозиции двух мод, околополюсные зоны имеют одинаковый знак. Северо-южная асимметрия поверхностного магнитного поля предоставляет возможность объяснить наблюданную вблизи эпох максимумов солнечных циклов магнитную аномалию полярных полей (кажущуюся «монопольность» полоидального поля) [11].

Таким образом, включение в модель $\alpha\Omega$ -динамо эффектов «магнитной антиплавучести», учет нелинейности, а также привлечение последних гелиосейсмологических данных о внутреннем вращении Солнца расширяет возможности теории турбулентного динамо при объяснении наблюдавшихся закономерностей и аномалий солнечных циклов.

1. Вайнштейн С. И. Магнитные поля в космосе. — М.: Наука, 1983.—240 с.
2. Вайнштейн С. И., Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А. Турбулентное динамо в астрофизике. — М: Наука, 1980.—352 с.
3. Кичатинов Л. Л., Пипин В. В. Плавучесть среднего магнитного поля в турбулентной среде // Письма в Астрон. журн.—1993.—19, № 6.—С. 557—563.
4. Котов В. А., Ханейчук В. И. Цап Т. Т. К измерениям магнитного разбаланса Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 3.—С. 205—216.
5. Краузэ Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. — М: Мир, 1984.—320 с.
6. Криводубский В. Н. О переносе магнитных полей в турбулентной оболочке Солнца // Астрон. журн.—1984.—61, № 2.—С. 354—365.
7. Криводубский В. Н. Интенсивность источников магнитных полей солнечного $\alpha\Omega$ -динамо// Астрон. журн.—1984.—61, № 3.—С. 540—548.
8. Криводубский В. Н. Перенос крупномасштабного магнитного поля Солнца, обусловленный неоднородностью плотности вещества конвективной зоны // Письма в Астрон. журн.—1987.—13, № 9.—С. 803—810.
9. Криводубский В. Н. Турбулентный перенос крупномасштабного магнитного поля во вращающейся конвективной зоне Солнца // Астрон. журн.—1992.—69, № 4.—С. 842—849.
10. Криводубский В. Н. Вращательная анизотропия и магнитное подавление гиротропной турбулентности в конвективной зоне Солнца // Астрон. журн.—1998.—75, № 1.—С. 139—143.
11. Криводубский В. Н. О структуре глобального магнитного поля Солнца, возбуждаемого механизмом турбулентного динамо // Астрон. журн.—2001.—78, № 9.—С. 649—658.

12. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. — М: Наука, 1980.—340 с.
13. Паркер Е. Космические магнитные поля: в 2-х частях. — М: Мир, 1982.
14. Стикс М. Теория динамо и солнечный цикл // Проблемы солнечной активности / Под ред. В. Бумба, И. Клечек. — М: Мир, 1979.—С. 143—172.
15. Basu S. Seismology of the base of the solar convection zone // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1997.—288.—P. 572—584.
16. Charbonneau P., Christensen-Dalsgaard J., Henning R., et al. Helioseismic constraints on the structure of solar tachocline // Astrophys. J.—1999.—527.—P. 445—460.
17. Drobyshevskij E. M. Magnetic field transfer by two-dimensional convection and solar “semi-dynamo” // Astrophys. Space Sci.—1977.—46, N 1.—P. 41—49.
18. Howard R. Studies of solar magnetic fields. I. The average field strengths // Solar Phys.—1974.—38.—P. 283—299.
19. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Dynamic variations at the base of the solar convection zone // Science.—2000.—287.—P. 2456—2460.
20. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Deeply penetrating banded zonal flows in the solar convection zone // Astrophys. J.—2000.—533.—P. L163—L166.
21. Kryvodubskyj V. N., Rüdiger G., Kichatinov L. L. Non-linear diamagnetic transfer and magnetic buoyancy of large-scale magnetic field in the convective zone of the Sun // Вісн. Київ. ун.-ту. Астрономія.—1994.—№ 33.—С. 55—58.
22. Ossendrijver M. The solar dynamo // Astron. and Astrophys. Rev.—2003.—11, N 4.—P. 287—367.
23. Roxburgh I. W. Convection and solar structure // Astron. and Astrophys.—1978.—65.—P. 281—285.
24. Rüdiger G., Kitchatinov L. L. Alpha-effect and α -quenching // Astron. and Astrophys.—1993.—269.—P. 581—588.
25. Spiegel E. A., Zahn J.-P. The solar tachocline // Astron. and Astrophys.—1992.—265.—P. 106—114.
26. Stix M. The Sun. — Berlin: Verlag, 1989.—200 p.

PROBLEMS OF SOLAR DYNAMO-CYCLE

V.N.Kryvodubskyi

The results of the researches devoted to overcoming some difficulties of the theory of solar turbulent dynamo are presented. Allowance for magnetic quenching of α -effect and newer helioseismic data extends the possibilities of $\alpha\Omega$ -dynamo mechanism for interpretation of the observed regularities and anomalies of the solar magnetism. Inclusion of «magnetic anti buoyancy» effects to model of turbulent reconstruction of global magnetism enables us to impose restrictions on the magnitude of toroidal field excited by Ω -effect near the convection zone bottom. The period of Parker's dynamo-wave calculated in non-linear regime agrees to order of magnitude with observed duration of solar cycle. The use of recent data of helioseismic measurements of the inner rotation in dynamo-process leads to north-south asymmetry of the meridional field. At high-latitude regions of the convection zone, a quadrupolar mode is dominant in the net meridional field, which provides an explanation for the magnetic structure anomaly (apparent «monopole») of the global field observed near the maxima of solar cycles.

УДК 524.7-735-77

Е. Ю. Банникова, В. М. Конторович

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

Определение параметров космических струй по их тонкой структуре в радио- и рентгеновском диапазонах

Обговорюється відмінність зображень джетів позагалактичних джерел в радіо- і рентгенівському діапазонах та можливість отримання додаткової інформації про фізичні умови в джерелах. Дослідження проведено в рамках дифузійної моделі поширення релятивістських електронів від вузлів і гарячих точок джетів з урахуванням комптонівських та синхротронних втрат.

ВВЕДЕНИЕ

Высокое разрешение в рентгеновском диапазоне порядка 1", достигнутое на космическом рентгеновском телескопе Chandra (сравнимое с разрешением крупнейшего наземного радиотелескопа VLA) позволило получить карты джетов галактик и квазаров, на которых, как и в радиодиапазоне, обнаруживаются компактные структуры: узлы и горячие пятна. В отличие от радиодиапазона, где излучение обусловлено синхротронным механизмом (рис. 1), в жесткой области спектра может преобладать обратный комптон-эффект (рис. 2) с рассеянием релятивистских электронов либо на реликтовом фоне, либо на излучении центрального источника, либо на собственном (синхротроном) излучении.

Это дает возможность аналогично тому, как это было сделано ранее для радиодиапазона [1], независимо определить параметры джета, а также получить принципиально новые результаты, например оценить влияние неоднородности магнитного поля.

Основная идея используемого подхода состоит в том, что инъекция электронов, ускоренных до релятивистских энергий на ударных волнах, происходит локально (в месте расположения движущегося узла или горячего пятна). После этого, в рамках рассматриваемой модели, электроны диффузационно распространяются в окружающее пространство джета или радиоблока, теряя энергию на синхротоновские потери. В результате область излучения образует характерный «факел», геометрические параметры которого позволяют оценить па-

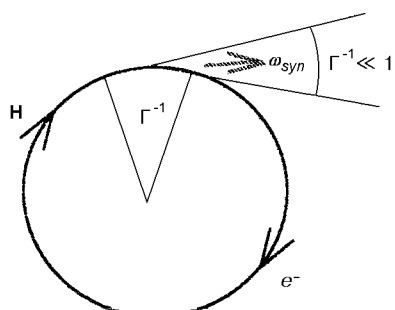


Рис. 1. Схема синхротронного механизма излучения

© Е. Ю. БАННИКОВА, В. М. КОНТОРОВИЧ, 2003

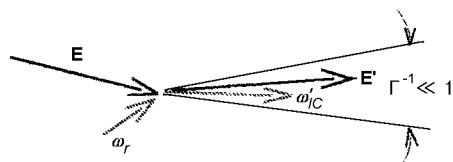


Рис. 2. Схема обратного комптоновского рассеяния

метры излучающей области, а используемая диффузионная модель позволяет рассчитать его форму на разных частотах. Здесь мы рассматриваем точечный источник инжекции, однако конечные размеры излучающей области, как и самопоглощение, можно учесть в рамках той же модели.

ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

Горячее пятно или узел рассматриваются нами как локализованный движущийся источник ультрарелятивистских электронов (рис. 3). Мы ограничиваемся диффузионным механизмом распространения электронов. Исходное уравнение представляет собой кинетическое уравнение для функции распределения релятивистских электронов $N(E, t, \mathbf{r})$ с заданным источником инжекции $Q = Q(E, t, \mathbf{r})$:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(B(E)N)}{\partial E} - D(E)\Delta N = Q(E, t, \mathbf{r}), \quad (1)$$

где

$$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Второе слагаемое описывает синхротронные и комптоновские потери электрона

$$B(E) = -\beta E^2,$$

где

$$\beta = \frac{32 \cdot \pi}{9} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \frac{W_H + W_r}{m^2 c^3}, \quad (2)$$

и $W_H + W_r$ — плотность энергии хаотического магнитного поля и излучения. Здесь мы рассматри-

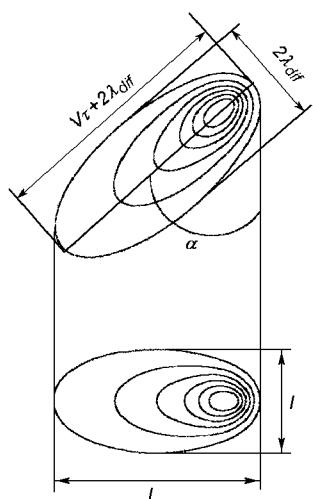


Рис. 3. Распределение интенсивности в окрестности узла («факел»), движущегося под углом α к лучу зрения при $V > V_{\text{dif}}$

ваем случай не зависящего от энергии E коэффициента диффузии $D(E) = D_0$. Зная функцию распределения электронов по источнику [1, 3, 15], находим интенсивность синхротронного излучения и излучения за счет обратного комптоновского рассеяния соответственно [4, 5]:

$$I_{\text{syn}}(\nu, t, \mathbf{r}) = \frac{\sqrt{3} \cdot e^3}{mc^2} \int_{E_1}^{E_2} dE \int dz \cdot N(E, t, \mathbf{r}) H \frac{\nu}{\nu_{\text{syn}}} \int_{\nu/\nu_{\text{syn}}}^{\infty} d\eta K_{5/3}(\eta), \quad (3)$$

$$I_{\text{IC}}(\nu, t, \mathbf{r}) = hc\nu \int dz \int dE \int_{\text{hv}}^{\infty} \sigma(\varepsilon, E) n_{\text{ph}}(\varepsilon) N(E, t, \mathbf{r}) d\varepsilon, \quad (4)$$

$$\nu_{\text{syn}} = \frac{3eH}{4\pi mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2, \\ \nu_{\text{IC}} = \nu_{\text{ph}} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2,$$

где H — проекция магнитного поля на экранную плоскость (x, y), $K_{5/3}(\dots)$ — модифицированная функция Бесселя, $\sigma(\varepsilon, E)$ — сечение рассеяния [2, 6], n_{ph} — распределение низкочастотного излучения с характерной частотой ν_{ph} . Спектр инжекции предполагается степенным ($E^{-\gamma_0}$) с $\gamma_0 = 2$ в интервале энергий $E_1 < E < E_2$ и равным нулю вне его. Инжекция включается в момент времени $t = 0$, соответствующий началу процесса эффективного ускорения частиц.

Существенным является то, что электроны с одной и той же энергией (или, соответственно, Лоренц-фактором $\Gamma = E/(mc^2)$) могут участвовать в излучении как в радио, так и в рентгеновском диапазоне, что продемонстрировано в таблице.

ОТЛИЧИЕ В РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ ПО ИСТОЧНИКУ В РАДИО- И РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНАХ

Мы выбираем источники в основном из списка объектов с обнаруженными рентгеновскими джетами (D. Harris, <http://hea-www.harvard.edu/XJET/>), у которых наблюдается узельная структура джета или горячих пятен килопарсековых масштабов как в радио, так и в рентгеновском диапазонах. В качестве примера приведем источники PKS 1136 и PKS 1354. (Аналогичная картина наблюдается для джета M 87 [9], см. также [1, 7]).

В джетах обоих источников (рис. 4) ярко выражены узельные структуры в обоих диапазонах.

Синхротронное излучение (радио-) и обратное комптоновское рассеяние (рентген) на реликтовом фоне с частотой максимума ω_r для электронов с одной и той же энергией

Синхротронное излучение			Лоренц-фактор	Обратное комптоновское рассеяние		
$H, \text{ мкТл}$	$\omega_{\text{syn}}, \text{ рад/с}$	диапазон	Γ	$\omega_r, \text{ рад/с}$	$\omega_{IC}, \text{ рад/с}$	$E_X, \text{ кэВ}$
10^{-4}	$9.4 \cdot 10^7$	дкм	$1.9 \cdot 10^3$	$1.02 \cdot 10^{12}$	$3.66 \cdot 10^{18}$	2.4
10^{-4}	$2.65 \cdot 10^8$	м	$3.17 \cdot 10^3$		$1.03 \cdot 10^{19}$	6.78
10^{-3}	$8 \cdot 10^7$	дкм	$5.50 \cdot 10^2$		$3.1 \cdot 10^{17}$	0.2
10^{-2}	$1.71 \cdot 10^9$	м	$8.06 \cdot 10^2$		$6.65 \cdot 10^{17}$	0.44
10^{-2}	$2.7 \cdot 10^9$	дцм	$1 \cdot 10^2$		$1.04 \cdot 10^{18}$	0.7
10^{-2}	$3.14 \cdot 10^{10}$	см	$3.45 \cdot 10^3$		$1.22 \cdot 10^{19}$	8.03
1	$1.71 \cdot 10^{11}$	см	$8.065 \cdot 10^2$		$6.65 \cdot 10^{17}$	0.44

Отличие радио- от рентгеновского изображения источников может быть связано с влиянием неоднородности магнитного поля. Проиллюстрируем это, рассматривая полученное нами решение для функции распределения в случае слабого неоднородного магнитного поля, когда потери полностью определяются комптоновским рассеянием на однородном реликтовом излучении. Тогда можно использовать полученное решение кинетического уравнения (1) для функции распределения $N(E, t, r)$ при однородных потерях [1]. При этом в выражении для интенсивности синхротронного излучения (3) магнитное поле может быть произвольной функцией координат. Это позволяет учесть влияние произвольной неоднородности магнитного поля на радиоизображение. Сравним расчетанные таким способом изображения в рентгене и в радио (рис. 5), соответствующие одной и той же функции распределения электронов. Одно из них формируется за счет обратного комптон-эффекта на реликте в X-диапазоне, другое — за счет синхротронного механизма в неоднородном магнитном поле в R-диапазоне. Видно, что в случае локализованного магнитного поля в радиодиапазоне будет излучать только область, где это поле относительно велико.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЖЕТА ЗС 273

Рассмотрим пример обратного комптон-эффекта на излучении центрального источника и реликтовом излучении для узлов джета ЗС 273. Наблюданное распределение интенсивности рентгеновского излучения по узлам было получено двумя коллективами авторов [11, 13]. Из воспроизведенного на рис. 6 распределения интенсивности излучения по узлам джета из работы Маршалла и др. [11] видно, что интенсивность рентгеновского излучения для близких к квазару узлов А и В резко спадает, а для

более далеких — выходит на плато. Естественно предположить, что X-излучение А и В узлов джета формируется за счет обратного комптон-эффекта на квантах центрального источника. Для остальных узлов излучение будем связывать с рассеянием на однородном реликтовом фоне. Для двух первых узлов А и В квадратичному спаду интенсивности $I_X \sim NL/(4\pi R^2)$ можно удовлетворить, если отношение концентраций электронов в узлах А и В равно $N_A/N_B \approx 2$ (а в остальных узлах концентрации электронов не изменяются). Используя известное значение плотности энергии реликтового излучения $W_{\text{СМВ}}$, согласно рис. 6 находим плотность энергии центрального источника на ближайшем узле А с учетом полученного отношения концентраций: $W_{\text{ES}} = 8W_{\text{СМВ}} \cdot 1/2$. Теперь можно оценить светимость центрального источника, зная расстояние до ЗС 273 ($r \approx 3 \cdot 10^{27} \text{ см}, z = 0.158$): $L = 4\pi R^2 c W_{\text{ES}} = 10^{40} \text{ Дж/с}$ (где $R = 4 \cdot 10^{23} \text{ см}$ — расстояние до ближайшего узла). Это значение точно совпадает с наблюдаемой светимостью ЗС 273.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря высокому разрешению в рентгеновском диапазоне появилась возможность получать изображения джетов радиогалактик и квазаров, создаваемое электронами с одной и той же энергией как в радиодиапазоне (синхротронным механизмом), так и в рентгеновском диапазоне (посредством обратного комптоновского рассеяния). Это направление бурно развивается, о чем свидетельствуют ряд замечательных обзорных докладов, сделанных на последнем Европейском астрономическом съезде JENAM 2003 в Будапеште [8, 10, 14].

Заметим, что в случае рассеяния на реликтовом излучении нам точно известны свойства рассеивающегося низкочастотного излучения и его характерная

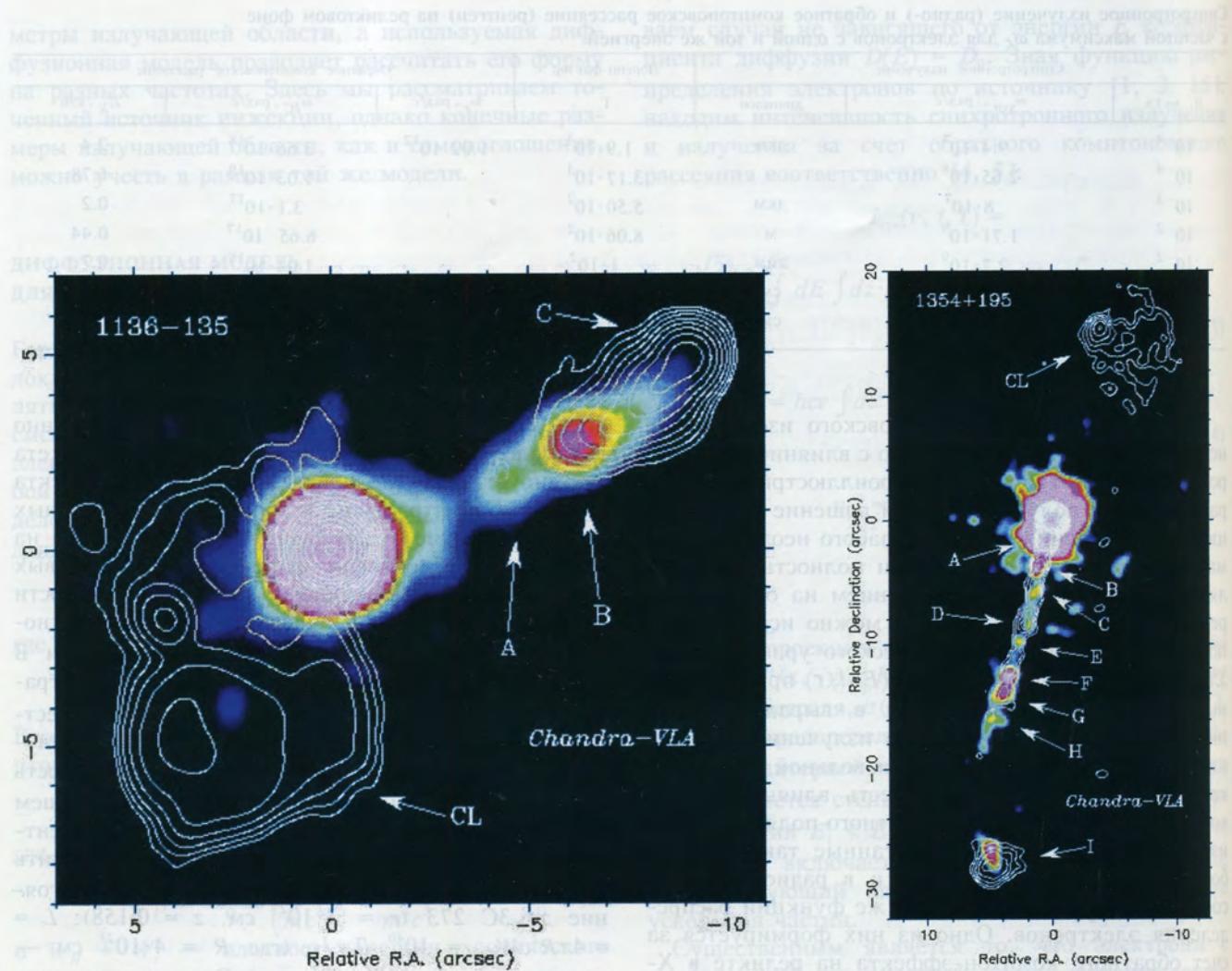


Рис. 4: а - радиоизофоты (VLA) и распределение рентгеновского излучения - цветовая карта (Chandra) квазара PKS 1136 по работе [12]. Видно смещение радиоизофот по отношению к рентгеновскому изображению; б - то же для источника PKS 1354 [12]. Видно совпадение областей излучения в радио- и рентгене. С благодарностью Р. М. Самбруне

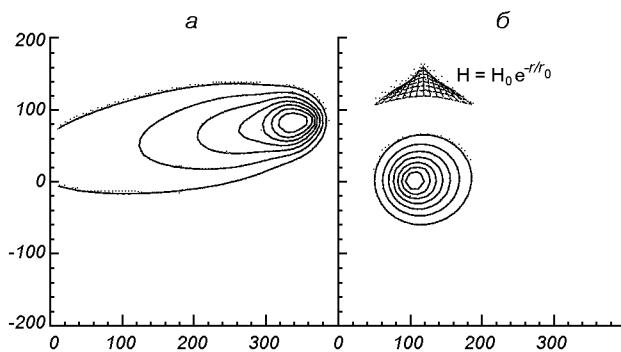


Рис. 5: *а* — модельное изображение источника в рентгеновском диапазоне при обратном комптоновском рассеянии на однородном реликтовом фоне. Синхротронные потери предполагаются несущественными. Остальные параметры соответствуют узлу А джета M 87 [1]; *б* — изображение того же модельного источника в радиодиапазоне за счет синхротронного излучения в экспоненциально спадающем неоднородном магнитном поле, которое показано в верхней части рисунка

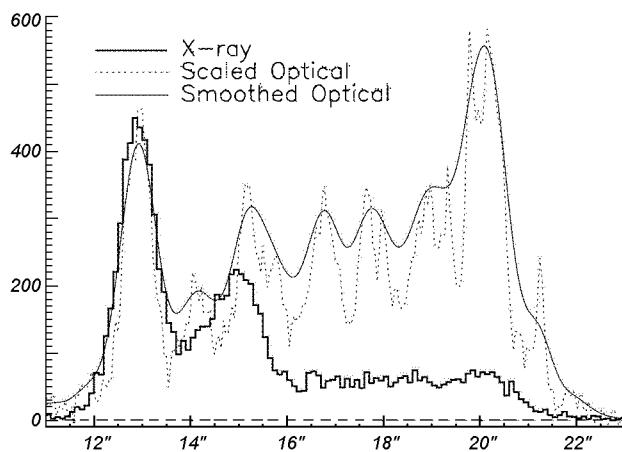


Рис. 6. Распределение интенсивности по узлам джета 3С 273 из работы [11]. С благодарностью Г. Л. Маршаллу

частота, играющая роль, аналогичную циклотронной частоте, определяемой неизвестным нам магнитным полем для синхротронного излучения. Если преобладает рассеяние на собственных синхротронных фотонах, то, зная спектр радиоисточника, по высокочастотному завалу в нем можно также точно находить характерную частоту рассеиваемых синхротронных квантов. Сравнивая расчетные и наблюдательные карты распределения интенсивности в рентгеновском диапазоне с радиокартами, исследуя форму факелов узлов и горячих пятен, можно не только проверить правильность и применимость теоретических моделей, но уточнить и получить новые комбинации измеряемых физических пара-

метров джетов, оценить такие важные факторы, как неоднородность магнитного поля, конечные размеры области инжекции и т. п.

Данная работа частично поддержана фондом ИНТАС, грант 00-00292.

1. Банникова Е. Ю., Конторович В. М. О возможности определения скорости джетов радиогалактик и квазаров по исследованию тонкой структуры их узлов при высоком угловом разрешении // Космічна наука та технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 305.
2. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Кvantовая электродинамика. — М.: Наука, 1980.—704 с.
3. Гестрин С. Г., Конторович В. М., Кочанов А. Е. Диффузионая модель протяженных радиокомпонентов и струй с движущимся источником ускоренных частиц // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 4.—С. 57.
4. Железняков В. В. Излучение в астрофизической плазме. — М.: Янус-К, 1997.—528 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — М.: Наука, 1988.—510 с.
6. Нагирнер Д. И. Комптоновское рассеяние в астрофизических объектах. — Санкт-Петербург: Изд-во Ленинградского ун-та, 2001.—55 с.
7. Bannikova E. Yu. Kontorovich V. M. Jet knots fine structure of cosmic radio sources in synchrotron and compton mechanisms of radiation in the diffusion model // JENAM 2003. Abstracts. — Budapest, 2003.—P. 12.
8. Courviosier T. Gamma-ray and radio astronomy // JENAM 2003. — Budapest, 2003.—P. 22.
9. Harris D. E., Biretta J. A., Junor W., et al. Flaring X-ray emission from HST-1, a knot in the M87 jet // astro-ph/0302270, 2003.
10. Livio M. Astrophysical jets // JENAM 2003. Abstracts. — Budapest, 2003.—P. 157.
11. Marshall H. L., Harris D. E., Grimes J. P., et al. Structure of the X-ray emission from the jet of 3C 273 // Astrophys. J.—2001.—549.—P. 167.
12. Sambruna R. M., Maraschi L., Tavecchio F., et al. A survey of extended radio jets in AGN with Chandra and HST: First results // astro-ph/0201412, 2002.
13. Sambruna R. M., Urry C. M., Tavecchio F., et al. Chandra observations of the X-ray jet of 3C 273 // Astrophys. J.—2001.—549.—P. 161.
14. Schwartz D. An X-ray of radio sources: the end of the story // JENAM 2003. Abstracts. — Budapest, 2003.—P. 9.
15. Valtaoja E. Diffusion of electrons in radio galaxies // Astron. and Astrophys.—1982.—111, N 2.—P. 213.

DETERMINATION OF JET PARAMETERS OF EXTRAGALAXY SOURCES FROM THEIR FINE STRUCTURE IN RADIO AND X-BANDS

E. Yu. Bannikova and V. M. Kontorovich

We discuss the distinction of jet images of extragalaxy sources in radio and X-ray bands and the possibilities to obtain some additional information on physical conditions in the sources from the distinction. The investigation was carried out within the framework of the diffusion model of propagation of relativistic electrons from jet knots and hot spots with the consideration for Compton and synchrotron losses.

УДК 519.8:519.2:523.9:520.2

В. П. Власенко², Ю. А. Селиванов¹, А. Ф. Сорокин², А. М. Щюх²

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

²Центр приймання наукової інформації Національного центру керування та випробувань космічних засобів Національного космічного агентства України, Євпаторія

Синхронные наблюдения радиоизлучения Солнца на разных длинах волн

Обговорюються методики і результати пробних спостережень Сонця в радіодіапазоні за допомогою засобів Національного центру керування й випробувань космічних засобів НКАУ, синхронізовані з оптичними спостереженнями. Побудовано розподіли щільноти джерел радіовипромінювання, погоджені з даними оптичних вимірювань. Формулюються задачі подальшого розвитку методик спостережень і обробки даних.

ВВЕДЕНИЕ

Решение фундаментальной проблемы изучения солнечно-земных связей требует построения адекватных физических моделей как отдельных гелио-процессов, так и их взаимосвязей. Наиболее актуальным в этом смысле является исследование каналов энергомассопереноса на трассе Солнце — Земля. В первую очередь необходимо выявить связь процессов на поверхности Солнца с параметрами плазмы короны, околосолнечного и межпланетного пространства, магнитосферы Земли. Так как оптическое излучение корональных дыр практически недоступно для изучения на расстояниях более $0.1R_{\odot}$, где R_{\odot} — радиус Солнца, основным объектом наблюдения здесь служит излучение плазмы короны и солнечного ветра в радиодиапазоне. Необходимо последовательное слежение за прохождением корональных дыр и выбросов из них по диску Солнца и далее в межпланетном пространстве на траекториях, направленных на Землю или проезжающих на ее орбиту. Соответственно, необходимо выявить высотную стратификацию параметров плазмы и магнитного поля в районе корональной дыры и дальнейшую эволюцию плазмы, выходящей из нее.

Малые времена развития солнечных образований, стохастичность их появления, большие скорости

движения плазмы солнечного ветра, сложность интерпретации радиоизображений вызывают необходимость долговременных синхронных наблюдений в оптическом и радиодиапазонах. Подобные синхронные наблюдения поверхности Солнца показали их высокую эффективность для понимания физики процессов, происходящих на Солнце [3]. С другой стороны, учет этих же факторов приводит к использованию новых эффективных математических алгоритмов в обработке полученных данных. В настоящее время становится все более ясно, что именно комплексные исследования, сочетающие данные измерений в различных диапазонах с представленными в компьютерном виде моделями явлений, определяют важное направление дальнейшего продвижения в этой области исследований. При этом построение полной картины солнечно-земных связей предполагает включение в анализ данных спутниковых измерений (вариации магнитных и электрических полей, потоки частиц и их спектры), экспериментальных исследований ионосферы и замыкается анализом геопроявлений.

В данной работе обсуждаются методики и результаты пробных синхронных наблюдений в оптическом и радиодиапазоне (соответствующие электронные плотности отсечки — 10^{11} , $4 \cdot 10^9$, 10^8 см^{-3}), на основании чего формулируются задачи для дальнейших работ. Построены распределения плотности

источников радиоизлучения до расстояний порядка R_{\odot} , согласованные с данными оптических измерений.

Осуществление подобных наблюдений в постоянном режиме позволит построить временную картину развития активных областей на Солнце и распространение выбросов из них на траекториях, направленных на Землю или проецирующихся на ее орбиту.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРОВЕДЕНИЯ СИНХРОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РАЗНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН

Основной механизм радиоизлучения спокойного Солнца — тормозное излучение полностью ионизованного газа солнечной короны и хромосферы.

Излучение фотосфера в радиодиапазоне недоступно для наблюдений из-за сильного поглощения в хромосфере, за исключением субмиллиметровой области ($\lambda \sim 100$ мкм), где хромосфера становится прозрачной. Граница между хромосферой и короной находится на расстоянии $r = 1.04R_{\odot}$ от центра Солнца, что соответствует высоте 28000 км над поверхностью фотосфера. На метровых и более длинных волнах наблюдается только радиоизлучение короны, а на дециметровых и более коротких появляется вклад хромосферы. По этой причине угловой размер источника радиоизлучения, связанного с Солнцем, на метровых и дециметровых волнах значительно больше видимого диска.

Температура короны $T_{\text{кор}}$ в среднем порядка нескольких миллионов градусов. В хромосфере наблюдается сильный градиент температуры: от 7000 К до 20000 К, в среднем — 10^4 К. Радиоизлучение короны в простейшем варианте можно представить двухслойной моделью. В этой модели яркостная температура в направлении центра видимого диска Солнца складывается из ослабленного короной излучения хромосферы с температурой T_{xp} (оно рассматривается как фоновое излучение) и из излучения короны с учетом самопоглощения:

$$T_b = T_{\text{xp}} \exp(-\tau_{\text{кор}}) + T_{\text{кор}} [1 - \exp(-\tau_{\text{кор}})]. \quad (1)$$

Оптическая глубина короны $\tau_{\text{кор}}$ в направлении на центр солнечного диска определяется интегралом

$$\tau_{\text{кор}} = \int_{1.04R_{\odot}}^{\infty} N_e^2 dr. \quad (2)$$

Распределение электронной концентрации по высоте в короне можно представить формулой

$$N(r) = 10^8(1.5r^{-6} + 3r^{-16}), \text{ см}^{-3}, \quad (3)$$

где r выражено в радиусах Солнца. Эта формула связывает шкалу высот в солнечной короне с нелинейной шкалой электронных концентраций.

На волнах, где корона практически прозрачна ($\tau_{\text{кор}} < 1$), наблюдается усиление яркости к краю, что объясняется неизотермичностью короны. На длинах волн выше 1.2 м, где оптическая глубина короны больше единицы, все радиоизлучение уже определяется только короной. Отсутствие заметного вклада от более холодной хромосферы приводит к тому, что нет усиления яркости к краю. Радиофоты короны имеют несколько эллиптическую форму, что является следствием несферичности короны.

Для каждой частоты есть критическое значение электронной концентрации $N_{\text{кр}}$, при котором коэффициент преломления корональной плазмы равен нулю. Значение $N_{\text{кр}}$ соответствует некоторому уровню в короне, определяемому зависимостью (3). Этот уровень является как бы зеркалом для радиоволн, из-под него радиоизлучение выйти к наблюдателю не может. С другой стороны, в короне есть уровень, до которого на луче зрения наблюдателя оптическая глубина короны по тормозному поглощению (2) равна единице, согласно (3) ему соответствует некоторое значение электронной концентрации $N_{\tau=1}$. При преобладании тормозного механизма основная часть излучения поступает именно из области вблизи уровня с $N = N_{\tau=1}$.

Для излучения с длиной волны короче 50 см уровень $N_{\tau=1}$ расположен в короне выше, чем уровень $N_{\text{кр}}$, и все радиоизлучение короны определяется только свободно-свободными переходами [2]. Однако на длине волны $\lambda > 50$ см ситуация обратная, уровень $N_{\text{кр}}$ («плазменное зеркало») расположен выше, чем уровень $N_{\tau=1}$. Это приводит к сдвигу вверх нижнего предела интегрирования в (2). Оптическая глубина обрезается, что приводит к уменьшению яркостной температуры. Еще одна причина снижения T_b — уровень $N_{\text{кр}}$ отсекает от наблюдателя внутренние, более горячие слои короны, и наблюдаемое излучение идет из внешних слоев короны, где температура ниже и плотность плазмы меньше. Таким образом, электромагнитное излучение выходит из слоев плазмы с плотностью, соответствующей частоте отсечки:

$$f > f_{\text{пл}} = 0.989 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{n_{\text{кр}}}, \quad (4)$$

где f , Гц — частота излучения, $f_{\text{пл}}$ — критическая частота плазменного слоя, $n_{\text{кр}}$, см⁻³ — концентрация электронов в плазменном слое, что позволяет

стратифицировать измерения по высоте в разных диапазонах по электронной плотности [2]. Для координатной привязки этих данных необходимо разработать или выбрать модель распределения плазмы в изучаемой области пространства. Теоретическая модель плазменных образований необходима и для понимания механизма магнитотормозного излучения, и составления карты магнитных полей по поляризационным измерениям. Существенным при этом может оказаться характер спектра низкочастотных колебаний регистрируемого излучения.

В течение цикла солнечной активности наблюдается изменение полного потока радиоизлучения примерно в два раза. Переменная составляющая обязана своим происхождением корональным конденсациям — уплотнениям над большими группами солнечных пятен, которые удерживаются петлями сильного магнитного поля. Электронная плотность внутри конденсации превышает 10^9 см^{-3} , в то время как плотность окружающей плазмы порядка 10^8 см^{-3} . Конденсации оптически толста по тормозному излучению на длинах волн $\lambda \geq 10 \text{ см}$ и может наблюдаться как яркое пятно на фоне окружающего излучения невозмущенной короны. На более длинных волнах влияние конденсации слабее из-за увеличения поглощения верхними слоями короны с ростом λ . Конденсации, расположенные вблизи лимба Солнца, приводят к искажению формы радиоизображения Солнца.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Для построения пространственного распределения плазмы и выбросов из активных областей на Солнце синхронные измерения радиоизлучения Солнца производилось в нескольких диапазонах длин волн. Для этого были задействованы один из крупнейших в мире полноповоротный радиотелескоп РТ-70 с диаметром главного зеркала 70 м и антennaя система АДУ-1000 (полноповоротная антennaя решетка из 8 зеркал $64 \times 28 \text{ м}$). Использование таких больших антенн позволило получить высокое пространственное разрешение, что необходимо для наблюдения мелкомасштабных структур в короне Солнца. Эксперимент по исследованию радиоизлучения Солнца проводился 20 мая 2003 года на двух длинах волн, $\lambda\lambda = 6 \text{ и } 32 \text{ см}$ (РТ-70 и АДУ-1000 соответственно). Ширина диаграммы направленности составляет $2.6'$ для РТ-70 и $16' \times 40'$ для АДУ-1000.

Измерение радиоизлучения Солнца проводилось

путем сканирования диаграммы направленности антенны по площадке $2^\circ \times 2^\circ$ (РТ-70) и $8^\circ \times 8^\circ$ (АДУ-1000) на фоне программного сопровождения объекта исследования. Затем осуществлялась координатная привязка данных измерений, и учитывались поправки, связанные с вращением Земли. Высокая чувствительность и узкая диаграмма направленности радиотелескопа РТ-70 позволяет в первом приближении строить радиоизображение Солнца путем интерполяции данных измерений (рис. 2, а).

На АДУ-1000 ширина диаграммы направленности сравнима с размером Солнца, поэтому для получения его радиоизображения необходимо его восстановить, например, решением некорректной задачи с введением функционала А. Н. Тихонова [4]. В связи с этим разработана методика визуализации изображений, позволяющая существенно улучшить разрешающую способность радиоприемного устройства. Для этого используется трехканальная приемная система, диаграммы направленности каналов которой расположены в пространстве, как показано на рис. 1.

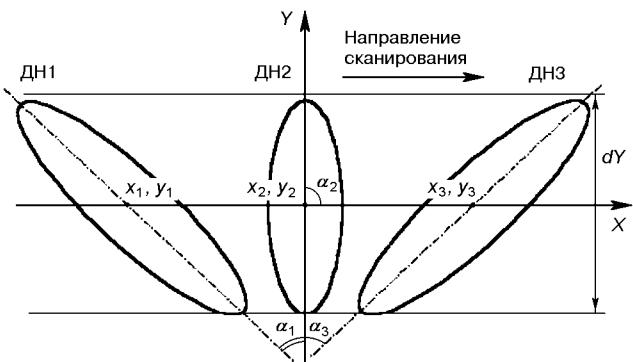


Рис. 1. Диаграммы направленности каналов трехканальной приемной системы

Основные требования к расположению ДН в картинной плоскости следующие:

1. $X_1 = \text{var1}, X_2 = \text{var2}, X_3 = \text{var3},$
2. $Y_1 = Y_2 = Y_3 = \text{const},$
3. $\alpha_1 = \alpha_3 = 45^\circ, \alpha_2 = 90^\circ.$

4. Координаты крайних точек ДН по оси ординат должны быть равны между собой.

Сигналы, принимаемые данными ДН, при сканировании опишутся следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} f_1(\tau) &= \int \int_{(X)(Y)} K_1(\tau - x, y) \cdot U(x, y) dy dx, \\ f_2(\tau) &= \int \int_{(X)(Y)} K_2(\tau - x, y) \cdot U(x, y) dy dx, \\ f_3(\tau) &= \int \int_{(X)(Y)} K_3(\tau - x, y) \cdot U(x, y) dy dx, \end{aligned} \quad (5)$$

где: $U(x, y)$ — функция, описывающая распределение концентрации радиоисточников в картинной плоскости; $K_1(\tau - x, y)$, $K_2(\tau - x, y)$, $K_3(\tau - x, y)$ — функции, описывающие ДН; $f_1(\tau)$, $f_2(\tau)$, $f_3(\tau)$ — сигналы на выходе трех каналов.

Будем искать решение системы уравнений (1) в виде

$$U(x, y) = \sum_i \sum_j u_{i,j} \cdot g_{i,j}(x, y), \quad (6)$$

где $g_{i,j}(x, y)$ — некоторая полная на области $X \times Y$ система функций. Подстановка (6) в (5) дает

$$\begin{aligned} f_1(\tau) &= \sum_i \sum_j u_{i,j} \cdot h_{1,i,j}(\tau), \\ f_2(\tau) &= \sum_i \sum_j u_{i,j} \cdot h_{2,i,j}(\tau), \\ f_3(\tau) &= \sum_i \sum_j u_{i,j} \cdot h_{3,i,j}(\tau), \end{aligned} \quad (7)$$

где обозначено

$$\begin{aligned} h_{1,i,j}(\tau) &= \int \int_{(X)(Y)} K_1(\tau - x, y) \cdot g_{i,j}(x, y) dy dx, \\ h_{2,i,j}(\tau) &= \int \int_{(X)(Y)} K_2(\tau - x, y) \cdot g_{i,j}(x, y) dy dx, \\ h_{3,i,j}(\tau) &= \int \int_{(X)(Y)} K_3(\tau - x, y) \cdot g_{i,j}(x, y) dy dx. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, для решения задачи визуализации надо найти коэффициенты $u_{i,j}$ разложения (7).

Для этого из (8) формируется система линейно-независимых функций вида

$$\psi_{i,j}(\tau, n) = \begin{cases} h_{1,i,j}(\tau), & \text{если } n = 1, \\ h_{2,i,j}(\tau), & \text{если } n = 2, \\ h_{3,i,j}(\tau), & \text{если } n = 3, \end{cases} \quad (9)$$

из которых с помощью процесса ортогонализации

$$\chi_l(\tau, n) = \frac{v_l(\tau, n)}{|v_l(\tau, n)|}, \quad (10)$$

где

$$v_l(\tau, n) = \psi_l(\tau, n), \quad (11)$$

$$v_{l+1}(\tau, n) = \psi_{l+1}(\tau, n) - \sum_{k=1}^l (\chi_k, \psi_{l+1}) \cdot \chi_k(\tau, n),$$

$$l = 1, 2, \dots, i \cdot j,$$

получаем систему ортогональных функций χ_l . Далее по форме принятых сигналов $f_1(\tau)$, $f_2(\tau)$, $f_3(\tau)$ формируется функция

$$F(\tau, n) = \begin{cases} f_1(\tau), & \text{если } n = 1, \\ f_2(\tau), & \text{если } n = 2, \\ f_3(\tau), & \text{если } n = 3. \end{cases} \quad (12)$$

Функция $F(\tau, n)$ разлагается по системе χ_l , вычисляемых по (10). Затем функции $\chi_l(\tau, n)$ заменяются через $\psi_s(\tau, n)$ ($s = 1, 2, \dots, l$) с соответствующими коэффициентами, вычисляемыми из (11). Найденные коэффициенты в соответствии с (12) и (7) позволяют записать искомую функцию распределения радиоисточников (6) в явном виде.

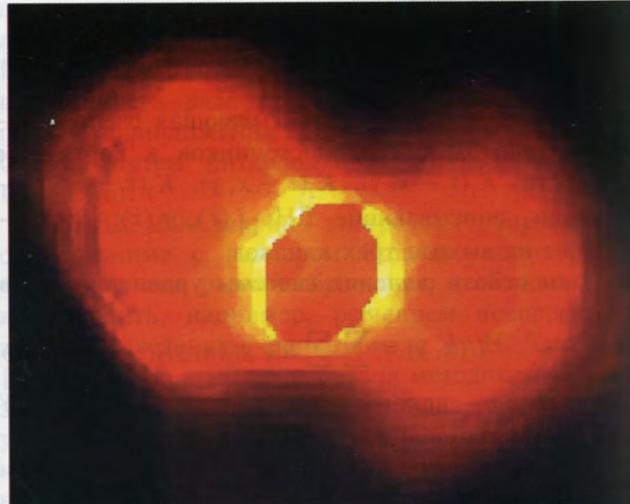
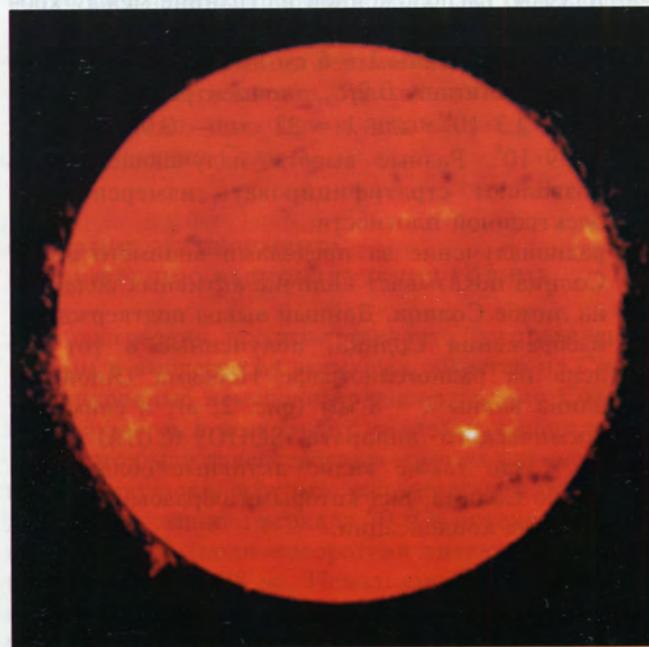
По данному алгоритму был составлен программный пакет в среде MatLab, реализующий работу данной методики. Результаты обработки данных измерений на АДУ-1000 с разрешением 2' (задано при обработке) представлены на рис. 2, б.

Анализ изображений (рис. 2, а и б), полученных в ходе проведения синхронных наблюдений Солнца, показал:

- данные изображения соответствуют излучению плазмы, расположенной на границе между хромосферой и короной;
- для длины волны $\lambda = 6$ см высота излучающего слоя достигает $0.9R_\odot$, концентрация плазмы $n_{kp} = 2.3 \cdot 10^{11}$; для $\lambda = 32$ см — $0.95R_\odot$, $n_{kp} = 8.9 \cdot 10^9$. Разные высоты излучающего слоя позволяют стратифицировать измерения по электронной плотности;
- радиоизлучение за пределами видимого диска Солнца показывает наличие активных областей на лимбе Солнца. Данный вывод подтверждают изображения Солнца, полученные в тот же день на радиогелиографе Нобеяма (Япония), длина волны $\lambda = 8$ мм (рис. 2, в), и снимки с космического аппарата SOHO (США) (рис. 2, г), где также видно активные области на лимбе Солнца, над которыми образованы корональные конденсации.

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ

Анализ успешных результатов применения описанной выше методики эксперимента стимулировал совершенствование алгоритмов обработки радиоизображений Солнца. Актуальность этой задачи возрастает также в связи с тем, что в дальнейшем предполагаются эксперименты по радионаблюдениям плазменных выбросов из Солнца при их движении по направлению к Земле. В этом сложном



ности каналов, которой расположены в пространстве, как показано на рисунке 33 = (1)λ.

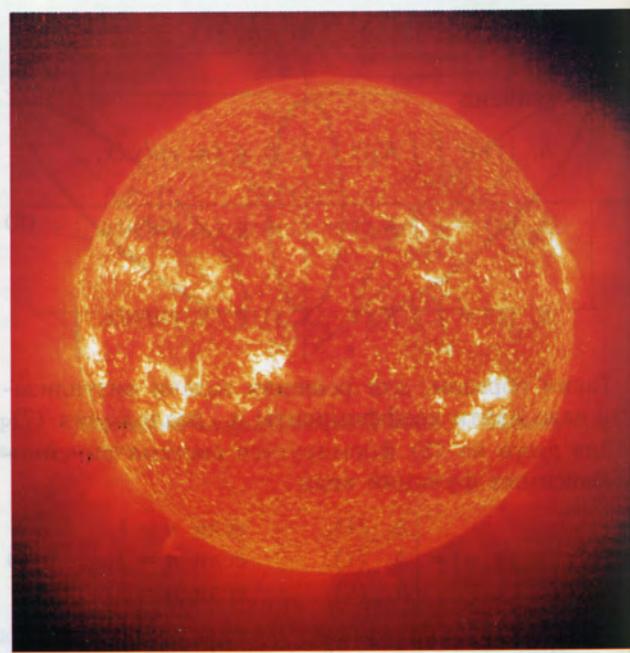


Рис. 2. Радиоизображения Солнца: *a* - на длине волны 6 см (РТ-70, Евпатория), *b* - на длине волны 32 см (АДУ - 1000, *c* - на длине волны 8 мм (радиогелиограф Нобеяма, Япония); *г* - снимок Солнца с космического аппарата SOHO (США)

случае излучение плазмоида будет изучаться в фоновом излучении Солнца. Как в рассмотренном выше, так и в последнем случае требуется возможно более полный учет всей доступной информации.

Рассмотрим задачу восстановления изображения $I(x)$ по размытым, зашумленным данным $D(x)$ и аппаратной функции $H(x)$:

$$D(x) = (H * I)(x) = \int_{S_y} S_y H(y - x) I(y) + N(x), \quad (13)$$

где $N(x)$ — шум, и интегрирование выполнено по площади в пространстве изображения.

Если функция $H(x)$, ядро интегрального уравнения (1), определяется экспериментально, то следует полагать ее случайной. Тогда, если известны

$$H_0 = EH, \quad J = E(H - H_0)\Sigma_1(H - H_0)^*, \quad (14)$$

где $\Sigma_1 \bullet = EI(\bullet, I)$, $I_0 = EI$, $EN = 0$, E — оператор математического ожидания, Σ_1 — корреляционный оператор, то задача (1) сводится к стандартной задаче с неслучайным оператором $H(x)$ и увеличенным шумом N , причем

$$H = H_0, \quad \tilde{N} = (H - H_0)I + N. \quad (15)$$

Для решения этой задачи на основе теории информации [6] создают модель изображения минимальной алгоритмической сложности: вводятся функция $\varphi(y)$ — псевдоизображение и $K(x)$ — радиально-симметричная выпуклая сглаживающая функция с конечным носителем, такие что

$$I(x) = \int_{V_y} V_y K\left(\frac{\|x - y\|}{\delta(x)^2}\right) \varphi(y), \quad (16)$$

где $\delta(x)$ — длина шкалы, которая измеряет локальную гладкость изображения, и интегрирование — по площади в пространстве псевдоизображения.

Функция $\varphi(y)$ находится как доставляющая минимум выражению

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_i w_i (D_i - (H \otimes I)_i) = \\ &= \sum_i w_i \left(D_i - \sum_j H_{j-i} \sum_k K_{k-j}(x_j) \varphi_k \right)^2 \end{aligned} \quad (17)$$

при дополнительном условии, что носитель сглаживающего ядра $K(x)$ имеет максимально возможные для данной точки x размеры. После этого из (16) находим неискаженное изображение $I(x)$.

Преимущества метода:

- дает максимально гладкое, в пределах заданной точности, приближение к исходным данным, то есть работает как метод максимума энтропии в

пределах каждой области, определяемой носителем ядра K ;

- эффективно устраняет ложные источники, возникающие на фоне слабого сигнала за счет некорректности задачи восстановления;
- позволяет учитывать априорную информацию о процессе измерений.

Описанный метод относится к лучшим в настоящее время методам обработки изображений. Однако анализ показал, что он может быть еще улучшен, в частности ускорен, за счет применения аппарата вейвлетов второго поколения [5, 7]. Работа над этим ведется нами в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные эксперименты показали возможность проведения постоянного синхронного мониторинга солнечной активности в радиодиапазоне.

2. Приведенная методика обработки изображений позволяет получить достаточную разрешающую способность антенных средств РТ-70 и АДУ-1000 в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн для анализа тонких структур в короне и на поверхности Солнца.

3. Полученные данные показали возможность исследования не только медленно изменяющегося компонента солнечного излучения, но и исследования короткопериодических структур на Солнце в динамике.

4. Наблюдения показали, что излучение возникает в корональных конденсациях, расположенных на высоте вплоть до 10^5 км выше активных факельных областей. В излучении преобладает медленно изменяющийся компонент, тесно связанный с областями солнечных пятен. Корреляция имеет место даже там, где солнечные пятна не видны в данный момент времени (например, возле лимба Солнца).

5. Построение радиоизображений Солнца на разных длинах волн позволяет исследовать разные уровни короны. Увеличение диапазона длин волн расширит возможности стратификации короны по электронной плотности.

1. Крюгер А. Солнечная радиоастрономия и радиофизика. — М.: Мир, 1984.—469 с.
2. Степанян Н. Н., Цветков Л. И., Маслов В. И. и др. Многодиапазонный синхронный мониторинг солнечной активности // Вторая Укр. конф. по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Киев, 2002.—С. 76.
3. Степанян Н. Н., Цветков Л. И., Сорокин А. Ф. и др. Проект. Корональные дыры и их проявления в геосфере // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2002.—98.—С. 230.

4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. Учебное пособие для вузов: Изд. 3-е, исправленное. — М.: Наука, 1986.—288 с.
5. Тюпанский В. Г., Янчук А. В., Селиванов Ю. А. Нелинейные вейвлетные методы в системе НОРДИС-ВАРИАНТ // Вторая Укр. конф. по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Киев, 2002.—С. 72.
6. Puetter R. C. Pixon-based multiresolution image reconstruction and the quantification of picture information content // Int. J. Image Syst. and Tech.—1995.—6.—P. 314—331.
7. Sweldens W. The lifting scheme: a custom-design construction of biorthogonal wavelets // J. Appl. Comp. Harm. Anal.—1996.—3, N 2.—P. 186—200.

SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF THE SOLAR RADIATION AT DIFFERENT RADIO FREQUENCIES

V. P. Vlasenko, Yu. A. Selivanov, A. F. Sorokin,
and A. M. Tsukh

We discuss some techniques and results of trial observations of the solar radiation at different radio frequencies with installations of the National Space Facilities Control and Test Center. The observations are synchronized with optical ones. Density distributions of radio emission sources coordinated with data of optical measurements are constructed. Some ways of further development of observational techniques and data processing are considered.

УДК 621.391:53.08

А. В. Антонов, Ю. М. Герасимов

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

Особенности изображения нелинейным двумерного космических источников методом восстановления

Розглядається двовимірне відновлення зображень космічних об'єктів нелінійним ітераційним методом. Для отримання високоякісного відновлення зображення поверхні джерела з активними утвореннями використовуються три види априорної інформації. Це кутовий розмір джерела, його середня яскравісна температура і невід'єність ітераційного розв'язку. Крайня роздільна здатність обмежується просторовою дискретністю реєстрації зображення.

Получение изображения космических источников является одной из приоритетных задач радиоастрономических наблюдений. Разрешающая способность наблюдаемого изображения определяется максимальными пространственными частотами, выделяемыми радиотелескопом. Однако применение современных нелинейных методов обработки изображений позволяет при определенных условиях существенно повысить разрешающую способность и реализовать эффект «сверхразрешения». При этом удается восстановить утраченные радиотелескопом элементы изображения. Такая возможность возникает при учете в процессе восстановления априорной информации об энергетических, либо пространственных характеристиках исследуемого космического объекта. Особенno эффективно применение нелинейных методов восстановления для обработки радиоастрономических наблюдений на небольших радиотелескопах, что существенно повышает их функциональные возможности и расширяет класс решаемых задач.

В частности, используя нелинейный итерационный метод восстановления изображения для обработки солнечных наблюдений на 2-м радиотелескопе РТ-2, работающем в 3-мм диапазоне [2], удается существенно увеличить информативность наблюдений активных образований на поверхности Солнца [1]. Нелинейный итерационный алгоритм

двумерного восстановления яркостной температуры $T_s(r)$ солнечного диска по данным его двумерного ортогонального сканирования $T_a(r)$ радиотелескопом с диаграммой направленности $A(r)$ имеет следующий вид:

$$T_s^{k+1}(r) = \{T_s^k(r) + \lambda [T_a(r) - T_s^k(r)*A(r)]\} \cdot F.$$

Здесь r — вектор координат, λ — параметр скорости восстановления, k — шаг итерации, знак « $*$ » обозначает операцию свертки, оператор F контролирует соответствие решения на каждом шаге итерации априорным условиям. При нормированной диаграмме направленности $A(r)$ максимальное значение $\lambda = 2$.

Исследование применения данного алгоритма для двумерного восстановления яркостной температуры Солнца с активными образованиями на его поверхности показало, что для реализации эффекта «сверхразрешения» при восстановлении активных образований априорной информации о неотрицательности решения недостаточно. Использование при восстановлении изображения оператора F , контролирующего только неотрицательность решения позволяет хорошо восстановить только границы солнечного диска. Активные образования восстанавливаются плохо, и на поверхности диска возникают значительные осцилляции. Эти эффекты являются результатом того, что в данном случае

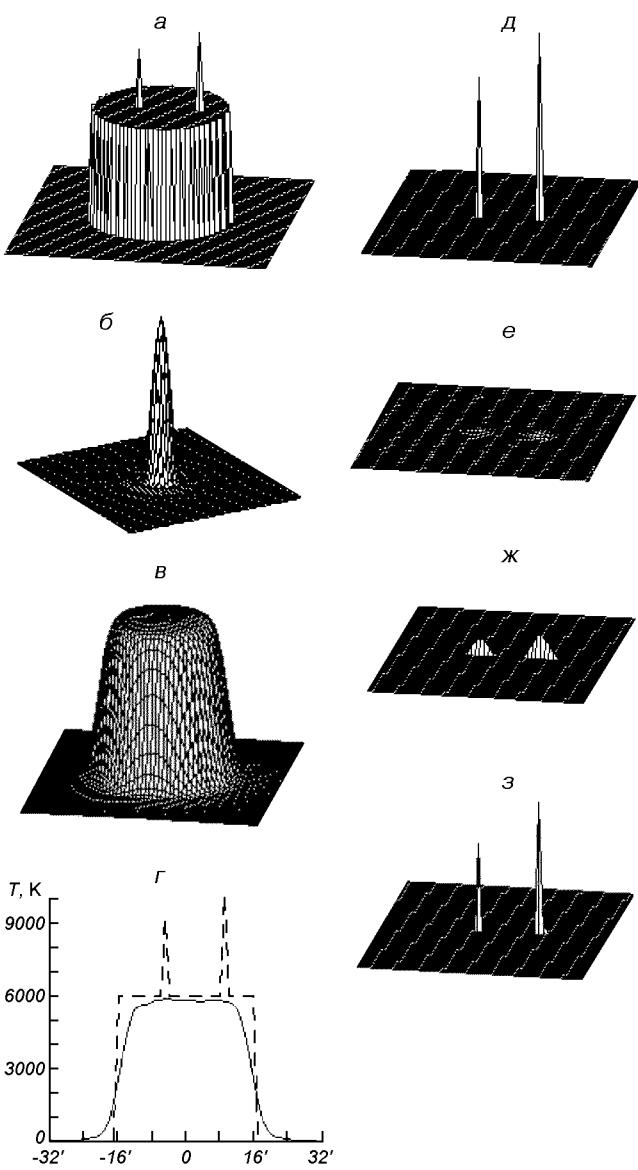
оператор F контролирует только восстановление основной энергетической составляющей солнечного диска.

Для качественного восстановления поверхности Солнца с активными образованиями необходимо использовать дополнительную априорную информацию о размере солнечного диска и его средней яркостной температуре. Это позволяет исключить из процесса восстановления данные параметры и ограничить его только восстановлением активных образований средней солнечной поверхности.

Поскольку процедура свертки деталей изображения является линейной операцией, то реализация данного решения заключается в вычитании из исходного восстанавливаемого изображения свертки изображения солнечного диска со средней яркостной температурой и ДН радиотелескопа. Полученное разностное изображение восстанавливается приведенным итерационным алгоритмом, в котором оператор F контролирует неотрицательность решения. Эффективность двумерного восстановления при данном подходе демонстрируется методом математического моделирования.

В качестве модели солнечного диска для диапазона волн 3 мм используем его цилиндрическую форму с угловым размером 32', средней яркостной температурой поверхности 6000 К и двумя активными образованиями гауссово вида с угловыми размерами 1.5' и яркостной температурой 9000 К и 10000 К. Ее вид приведен на рисунке (а). Двумерная свертка данной модели и ДН радиотелескопа (рисунок, б) шириной 7' показана на рисунке, в. Центральные сечения модели, проведенные через максимумы активных образований, для исходной модели и ее свертки, представленные на рисунке, г, соответственно пунктиром и сплошной линией, демонстрируют значительное сглаживание активных образований ДН.

Для сравнения на рисунке д и е показаны соответственно выделенные исходные активные образования на поверхности солнечного диска и их вид после выделения из свертки исходной модели Солнца и ДН радиотелескопа. Двумерная процедура итерационного восстановления изображения выполняется последовательно вначале по одной, а затем по другой координате. Результат восстановления по одной координате после 100 итераций приведен на рисунке ж. Окончательный результат получается после восстановления полученного одномерного решения по ортогональной координате. Его вид приведен на рисунке з. Данное моделирование проведено при отношении сигнал/шум равном 50. Такой уровень шума практически не ухудшает качество восстановления и позволяет реализовать «сверхраз-



Изображения активных образований: а — модель яркостной температуры солнечного диска в 3-мм диапазоне с двумя активными образованиями; б — двумерная ДН радиотелескопа шириной 7'; в — их двумерная свертка; г — сечение исходной модели солнечного диска (пунктирная линия) и аналогичное сечение сглаженного изображения (сплошная линия); д — выделенные активные образования на поверхности солнечного диска; е — вид выделенной свертки активных образований и ДН радиотелескопа; ж — одномерное восстановление изображения активных образований; з — Двумерное восстановление изображения активных образований

решение». При большем уровне шума хорошие результаты восстановления достигаются при использовании фильтрации методом скользящего среднего с регулируемым окном осреднения. Ре-

зультаты моделирования свидетельствуют о применимости данного подхода к восстановлению изображения солнечной поверхности с активными образованиями по реальным радиоастрономическим наблюдениям Солнца.

При этом, используя двумерное ортогональное сканирование радиотелескопом предварительно выделенной активной области на солнечном диске и восстановление данных сканирования с учетом информации о размере диска, его средней яркостной температуре, удается определить точные координаты активных образований, их размеры и интенсивность излучения.

Для получения полного восстановленного изображения диска необходимо выполнить двумерное восстановление данных картографирования его поверхности. Данная процедура выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется восстановление всех исходных элементов картографирования по прямому восхождению. При этом при восстановлении используется главное сечение ДН радиотелескопа по данной координате. На втором этапе полученные результаты восстановления по прямому восхождению, восстанавливаются по склонению с использованием главного сечения ДН радиотелескопа по этой координате. При построении карты

восстановленного изображения достигаемое разрешение определяется дискретом картографирования по обеим координатам.

1. Антонов А. В., Герасимов Ю. М., Руженцев Н. В. Применение итерационного метода к восстановлению параметров активных солнечных образований по наблюдениям в 3-мм диапазоне // Радиофизика и радиоастрономия.—2002.—7, № 3.—С. 246—253.
2. Antonov A. V., Churilov V. P., Gerasimov Yu. M., et al. Observations of Local Sources of Sun Activity at 94 GHz from Radiotelescope RT-2 // Proc. of The Fourth Int. Symp. «Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves» (June 4—9, 2001). — Kharkov, 2001.—Vol. 2.—P. 798—800.

PECULIARITIES OF A TWO-DIMENSIONAL IMAGE RECONSTRUCTION OF SPACE RADIANTS BY NONLINEAR METHOD

A. V. Antonov and Yu. M. Gerasimov

Two-dimensional reconstruction of space objects by the nonlinear iteration method is considered. Three aspects of *a priori* information is used to derive a high quality of image reconstruction of the surface of a radiant with active formations. The aspects are the angular size of a radiant, its medial brightness temperature, and nonnegativity of an iterative solution. The accessible resolving power is restricted to spatial discretization of detection of an image recovered.

УДК 502:330.15

В. І. Лялько¹, М. О. Попов¹, О. Ю. Петроченко²,
О. Д. Рябоконенко², О. І. Сахацький¹, О. Г. Харечко²

¹Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

²Український центр менеджменту землі та ресурсів, Київ

Метод класифікації стану лісів за матеріалами аерокосмічної зйомки на основі принципу злиття даних

Розглянуто методичний підхід до класифікації стану лісових ресурсів за багатоспектральними космічними зображеннями. Підхід у своїй теоретичній частині базується на синергетичній концепції злиття даних, його програмна реалізація передбачає використання елементів геоінформаційних технологій. Розроблено алгоритм класифікації, оснований на запропонованому критерії інформативності спектральних каналів і класифікаційному правилі визначення належності об'єкта до відповідного класу. На базі описаного алгоритму розроблено програмний модуль для класифікації багатоспектральних космічних зображень. Описано результати експериментальних досліджень запропонованого методу.

Як відомо, одним з ефективніших методів дослідження лісів є метод, оснований на використанні матеріалів багатоспектрального знімання поверхні Землі з космосу. Використання багатоспектральних знімків для вивчення рослинності базується на аналізі варіацій параметрів відбитого сонячного випромінювання в різних діапазонах спектру електромагнітних хвиль [2]. Для оброблення космічних зображень в останні часи застосують програмні системи ERDAS Imagine, PCI Geomatic, ErMapper та ін. [6]. Кожна така прикладна програмна система є високотехнологічним продуктом, але його повноцінне використання неможливе без потужної апаратної бази і високої кваліфікації фахівця-інтерпретатора даних.

Тому актуальною залишається проблема створення алгоритмів та програм, орієнтованих на вирішення тематичних задач, які можуть бути реалізовані на ПЕОМ типової конфігурації, і робота з якими потребує мінімальної комп'ютерної підготовленості користувача.

Нижче розглядається методичний підхід до вирішення однієї з таких задач, а саме до класифікування стану лісових ресурсів за багатоспектральними

космічними зображеннями. Підхід базується на синергетичній концепції злиття даних [3, 5], його програмна реалізація передбачає використання елементів геоінформаційних технологій [1].

Нехай S — область земної поверхні з лісами, стан яких підлягає вивчення методом дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Область S розкладається на сукупність елементарних одинакових за формою та розміром ділянок місцевості $\{S_i / S_i \in S; i = 1, 2, \dots\}$; при цьому $S_i \cap S_k = \emptyset, (i \neq k); \bigcup_{i=1,2,\dots} S_i = S$. Передбачається, що кожна ділянка місцевості S_i може належати до того чи іншого класу $K_m, m = 1, 2, \dots, M$, де M — загальна кількість класів. Метою вивченняожної окремої ділянки є її класифікація, тобто визначення, до якого класу вона належить.

При використанні системи ДЗЗ, що має N спектральних каналів, дляожної ділянки s_i земної поверхні може бути отримано до N зональних зображень. Якщо прийняти, що елементарні ділянці місцевості s_i відповідає один піксель на зображення, то задача вивчення ділянок зводиться до класифікування пікселів (іх також будемо позначати як s_i). При заданій геометричній формі піксела

повний опис складається з набору таких даних, як ім'я багатоспектрального зображення, місцеположення у площині зображення, амплітуда (або інтенсивність чи оптична щільність). Таким чином, на багатоспектральному зображені кожний піксель буде мати повний опис у вигляді кортежу

$$\langle \#, x, y, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N \rangle, \quad (1)$$

де $\#$ — номер багатоспектрального зображення; x, y — координати пікселя; $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$ — амплітуди ідентичних (за координатами) пікселів на відповідних спектральних зображеннях загальною кількістю N , що разом складають багатоспектральне зображення з номером $\#$.

Задача класифікування піксельних об'єктів ставиться таким чином. Кожний піксель s_i належить одному з K_m класів. Для кожного класу K_m ($m = 1, 2, \dots, M$) надана інформація I_m у вигляді навчальної вибірки $\langle v_m^+ \rangle$ множини позитивних прикладів $\langle v_m^+ \rangle \subseteq K_m$, що загалом утворюють загальну навчальну вибірку I :

$$I = I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_M. \quad (2)$$

Необхідно: 1) сформулювати критерій інформативності спектральних каналів; 2) розробити правило, яке дозволить визначати для будь-якого об'єкта $s_i \in S$ ($i = 1, 2, \dots$) достовірність μ_m його належності до класу K_m , тобто отримувати пару $\langle K_m, \mu_m \rangle$.

При оцінці інформативності спектральних каналів будемо вважати, що відома навчальна вибірка для кожного з K_m класів. Кожна кількісна ознака π_n ($n = 1, 2, \dots, N$) у відповідному спектральному каналі має певний діапазон значень; позначимо його d_{π_n} . У межах загальної навчальної вибірки I діапазон значень n -ї ознаки розраховується як

$$d_{\pi_n} = \max_{\bar{I}}(\pi_n) - \min_{\bar{I}}(\pi_n), \quad (3)$$

де $\max_{\bar{I}}(\pi_n)$ та $\min_{\bar{I}}(\pi_n)$ — найбільше та найменше значення цієї ознаки.

Для дослідження кореляції значень ознаки π_n з класами K_1, K_2, \dots, K_m розподілимо діапазон значень ознаки на одинакові за ширину інтервали. Ширина інтервалу визначається як

$$\Delta d_{\pi_n} = \frac{d_{\pi_n}}{|I|},$$

де $|I|$ — потужність загальної навчальної вибірки у теоретико-множинному розумінні.

Клас K_m будемо називати зіставленим з певним інтервалом ознаки π_n , яка розглядається, якщо в навчальній вибірці I_m позитивних прикладів по класу K_m матимемо приклад об'єкта, значення ознаки якого потрапляє до цього інтервалу.

Якщо кількісна ознака для об'єктів різних класів в кожній з N спектральних зон розподілена на відповідні інтервали, то, використовуючи загальну навчальну вибірку, для будь-якої спектральної зони можна визначитися, в який інтервал попали конкретні представники різних класів з цієї вибірки, а потім підрахувати кількість попадань класів у відповідні інтервали. Зрозуміло, розподіл попадань класів по інтервалах буде відрізнятися для різних спектральних каналів, а це означає, що різні спектральні канали неоднаково ефективні при класифікуванні об'єктів.

Впровадимо функцію F , яку будемо далі називати критеріальною функцією інформативності спектрального каналу:

$$F = 1 - \frac{1}{M(M-1)} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{j=1}^{nz} \left(l_{mj} \cdot \sum_{k=1}^M l_{kj} \right)}{\sum_{j=1}^{nz} l_{mj}}, \quad (5)$$

де M — кількість класів; nz — число інтервалів для ознаки спектрального каналу, що розглядається; l_{mj} — індикатор зіставлення,

$$l_{mj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо клас } k_m \text{ зіставлений з інтервалом } j, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Можна показати, що значення функції інформативності (5) лежать в межах від 0 до 1 і залежать від того, як зіставлені між собою класи та ознаки. Серед спектральних каналів той буде характеризуватися найбільшим значенням функції F , для ознаки якого кількість класів, одночасно зіставлених з кожним інтервалом, мінімальна. Будемо далі користуватися гіпотезою, що саме той спектральний канал і є найінформативішим; тоді формула (5) надає можливість кількісно порівнювати інформативності спектральних каналів та відбирати серед них найефективніші для класифікування об'єктів.

Введемо оцінку μ , яку далі будемо називати достовірністю належності об'єкта класу. Оцінки μ обчислюються для кожного інтервалу кожної ознаки по усіх класах за правилом, описаним в [4].

Класифікаційне правило містить поінтервальне подання кожної зі спектральних ознак π_1, π_2, \dots ,

π_N , при цьому для кожної ознаки вказуються номер n спектрального каналу ($n = 1, 2, \dots, N$) та інформація про розподіл класів по усіх інтервалах ознаки.

Для кожного інтервалу вказуються:

- 1) його верхня та нижня граници;
- 2) кількість прикладів із загальної навчальної вибірки, які потрапили до даного інтервалу по кожному класу K_m ;
- 3) достовірності належності об'єкта кожному з

класів. Всі перелічені дані формуються шляхом оброблення навчальної вибірки і розміщуються в створюваній інформаційній базі.

Розглянемо, використовуючи цю базу, механізм застосування класифікаційного правила R до конкретного піксельного об'єкту s_i . Об'єкт на багатоспектральному зображені за номером # може бути заданий деякими значеннями ознак по спектральних каналах. При класифікуванні здійснюється накладання значень ознак об'єкта на інтервали

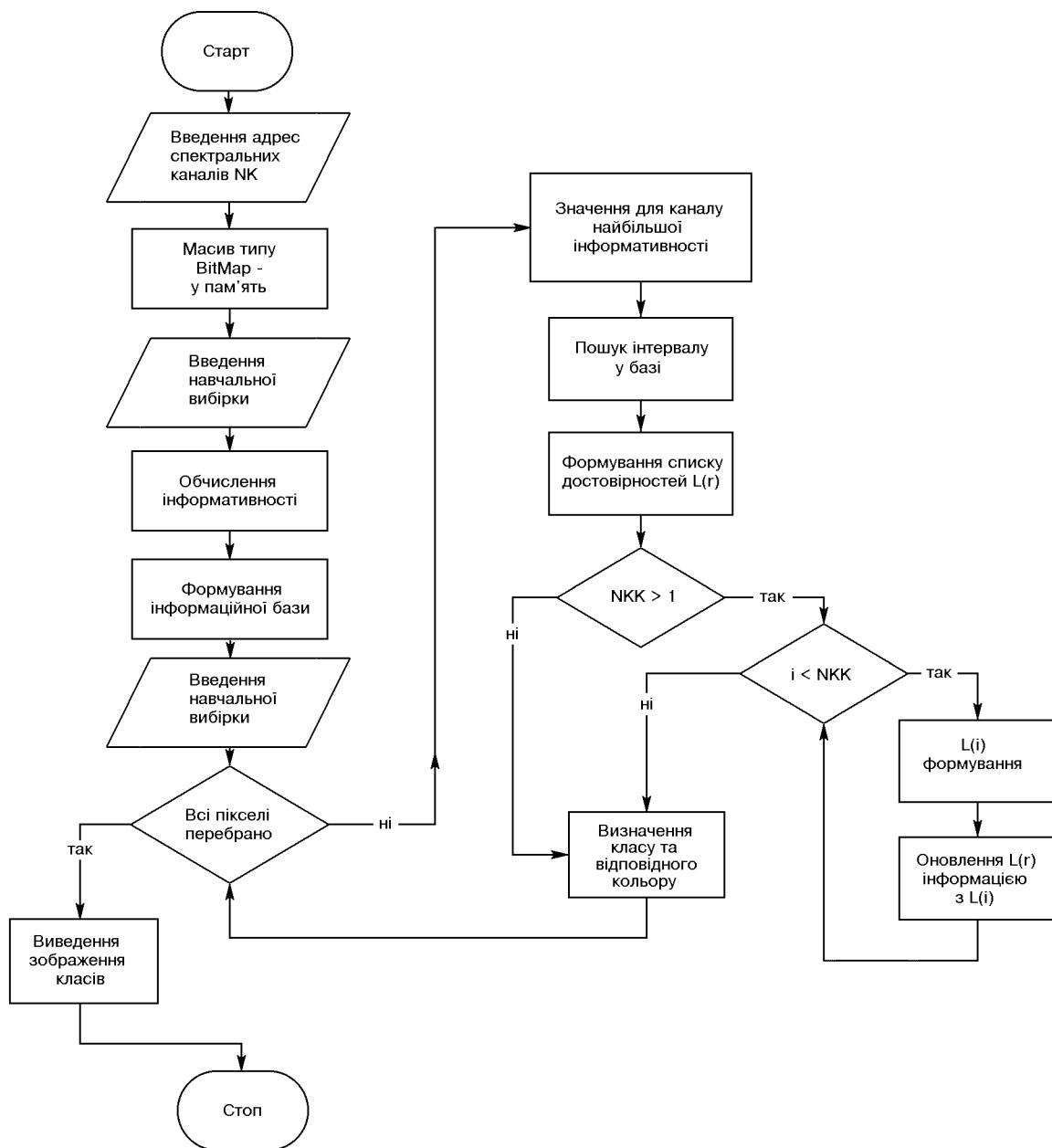


Рис. 1. Блок-схема алгоритму класифікування

подання ознак в інформаційній базі. Аналіз починається з розгляду найбільш суттєвої, з точки зору визначення належності об'єкта класу, ознаки, тобто з аналізу значень об'єкта у найбільш інформативному за формулою (5) спектральному каналі. Усередині області значень цієї ознаки розшукується інтервал, до якого потрапляє значення ознаки об'єкта, що розглядається. З отриманого таким чином інтервалу береться інформація щодо достовірності зіставлених класів. Ця інформація заноситься до списку L_1 . Це — первинний список класів, до яких може належати об'єкт, та їхніх достовірностей. Інформація по наступному за своєю інформативністю спектральному каналу заноситься до списку L_2 . З тих двох списків формується новий список L_3 і т. д. [4]. Процес продовжується із залученням чергового спектрального каналу до тих пір, поки в остаточному списку не залишиться один клас або не буде проаналізована інформація про ознаки даного об'єкта по всіх спектральних каналах. Таким чином, у ході послідовного аналізу спектральних ознак об'єкта має місце злиття даних з відсічкою зайнших класів і коригуванням значень достовірності для класів, що залишаються у списку.

Для застосування класифікаційного правила до конкретних об'єктів з використанням запропонованого вище критерію інформативності спектральних каналів та інформаційної бази використаний алгоритм, блок-схема якого надана на рис. 1.

На базі даного алгоритму розроблено програмний модуль оброблення багатоспектральних зображень, для нього обрано середовище програмування Delphi Enterprise version 6.0.

Було проведено перевірку точності результатів класифікування за допомогою даного методу. Точність оцінюється таким чином. Спочатку для кожного класу підраховується R_i — відношення кількості правильно розпізнаних пікселів до кількості невірно розпізнаних пікселів у межах цієї тестової ділянки:

$$R_i = v_i / r_i. \quad (6)$$

Далі підраховується загальна оцінка точності роботи методу $R_{\text{зар}}$ як середнє значення R_i для кожного класу:

$$R_{\text{зар}} = \frac{\sum_i R_i}{N_{\text{cl}}} \cdot 100, \quad (7)$$

де N_{cl} — кількість класів, які були розпізнані.

З метою оцінки ефективності запропонованого алгоритму класифікування проведено два експериментальних дослідження з використанням космічного знімка, отриманого за допомогою космічного

апарата КА «Landsat-5» у 1988 р. для території зони відчуження Чорнобильської АЕС (рис. 2).

У експериментах використано такі тестові ділянки: 1) ліс, пошкоджений шовкопрядом; 2) здоровий хвойний ліс; 3) листяний ліс; 4) луги; 5) вода.

Експеримент 1. Оцінка інформативності спектральних каналів та точності класифікування.

Інформативність каналів в експерименті становила 0.7 для 3-го спектрального каналу; 0.74 для 4-го каналу і 0.49 — для 5-го каналу. В межах першого експерименту проводилось класифікування за навчальною вибіркою із застосуванням інформації двох спектральних каналів з найбільшими значеннями функції інформативності. Оцінка точності класифікування становила $R_{\text{зар}} = 87\%$.

Експеримент 2. Його метою було порівняння результатів роботи описаного вище алгоритму з результатами методу байесівської класифікації пакету Erdas Imagine 8.4. Збирання сигнатур для навчання класів було проведено на тих самих ділянках. За допомогою мови макромоделювання пакету Erdas Imagine 8.4 було розроблено макрос для порівняння результатів класифікування, отриманих за допомогою двох алгоритмів. Для проведення порівняння зображення результатів класифікування було приведено до однакових значень псевдокольорів відповідних класів. Алгоритм порівняння: проводиться попікельне порівняння значень тематичних зображень — результатів класифікування; при збігу значень класів у відповідний піксель вихідного зображення пишемо значення 0, у іншому випадку — пишемо значення 1. В результаті було отримано підсумкове чорно-біле зображення, виведене на рис. 3. Тут значенню 0 відповідає білий колір, значенню 1 — чорний. Підрахунок статистики засобами пакету Erdas Imagine показав, що для всіх класів є 893471 пікселів, де значення класів збігаються, та 262670, що відрізняються. Таким чином, загальне розходження результатів класифікування п'яти класів становило 22 % від загальної кількості пікселів.

Таким чином, запропоновано новий метод класифікування стану лісових масивів по багатоспектральних космічних зображеннях, який у своєї теоретичній частині базується на концепції злиття даних. Розроблено алгоритм класифікування, оснований на запропонованому критерії інформативності спектральних каналів і правилі визначення належності об'єкта до відповідного класу. На базі описаного алгоритму з використанням елементів геоінформаційних технологій розроблено програмний модуль для класифікування багатоспектральних космічних зображень.



Рис. 2. Знімок території зони відчуження Чорнобильської АЕС, отриманий космічним апаратом «Landsat-5»



Рис. 3. Підсумкове чорно-біле зображення

Оцінено значення інформативності каналів: 0.7 для 3-го каналу, 0.74 для 4-го каналу і 0.49 для 5-го каналу. В цілому точність класифікування становила 87 %.

1. Бугаевский Л. М., Цветков В. Я. Геоинформационные системы. — М.: Златоуст, 2000.—214 с.
2. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988.—343 с.
3. Попов М. О. Сучасні погляди на інтерпретацію даних аерокосмічного дистанційного зондування Землі // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 110—115.
4. Попов М. О., Рябоконенко О. Д., Петроценко О. Ю. Підхід до класифікації стану лісових ресурсів по багатоспектральних космічних зображеннях на основі принципу злиття даних та використання елементів ГІС-технологій // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер. География.—2003.—16 (55), № 2.—С. 142—150.
5. Эбелинг В., Энгель А., Файтель Р. Физика процесов

эволюции. — М.: Эдиториал УРСС, 2001.—328 с.
6. Campbell J. B. Introduction to Remote Sensing, 2nd ed. — London: Taylor and Francis, 1996.—622 p.

METHOD FOR FOREST STATE CLASSIFICATION WITH THE USE OF AEROSPACE IMAGES BASED ON DATA FUSION METHOD

**V. I. Lyalko, M. O. Popov, O. Yu. Petrochenko,
O. D. Ryabokonenko, O. I. Sakhatskyi, O. G. Kharechko**

An approach to forest state classification on the basis of multispectral space images is considered. The approach is based on the data fusion method and synergism principle. The program application of the approach involves geoinformation technologies. A classification algorithm based on a proposed criterion of the information content of spectral bands is developed. Some results of experimental investigations of the method proposed are presented.

А. В. Агарков¹, А. Л. Макаров¹, С. А. Матвиенко¹,
А. В. Мелешко¹, Ю. А. Селиванов²

¹Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ;

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Комплексное исследование территории Украины по геофизическим параметрам с помощью космических систем «Січ-1М» и «Микроспутник»

Розглянуто можливість використання космічних систем «Січ-1М» і «Мікросупутник» для дистанційного зондування Землі за геофізичними параметрами.

На данный момент считаются доказанными аномальные изменения геофизических, геохимических и биохимических процессов в пределах нефтегазоносных структур [4] и в зонах с повышенной сейсмоактивностью. Ландшафт над залежью углеводородов характеризуется локальным изменением физико-химических параметров его элементов [7].

В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с помощью космических аппаратов оптико-электронного наблюдения производится только по геохимическим и биохимическим параметрам — по изменениям спектральных характеристик отраженного солнечного излучения верхним слоем оболочки Земли. В то же время одним из главных направлений эффективного изучения зон залегания полезных ископаемых считается изучение геофизических полей. Однако методики изучения аномалий по геофизическим параметрам нет [6]. Среди различных геофизических аномалий: магнитных, гравитационных, тепловых, радиационных, упруго-деформационных, сейсмоакустических и др. наиболее важными являются магнитные и гравитационные аномалии (рис. 1).

Кроме того, изучение тонкой структуры гравитационного и магнитного полей Земли (ГМПЗ) будет способствовать моделированию и исследованию сил, являющихся причинами смещения тектонических плит, возможных изменений структуры ман-

тии, литосферных движений, расширит возможности поиска месторождений полезных ископаемых и предсказания земных катаклизмов и позволит определить степень воздействия ГМПЗ на психофизическое состояние людей.

Решение задач глобального изучения ГМПЗ только наземными средствами не представляется возможным как с экономической, так и с технической точки зрения (70 % земной поверхности труднодоступны). Использование космических средств мониторинга совместно с наземными измерениями ГМПЗ (там, где это доступно) позволит оперативно выявлять скоротечные изменения в структуре ГМПЗ, изменения кривизны и высот геоида, которые происходят в момент или накануне землетрясений, извержений вулканов и других природных изменений регионального масштаба.

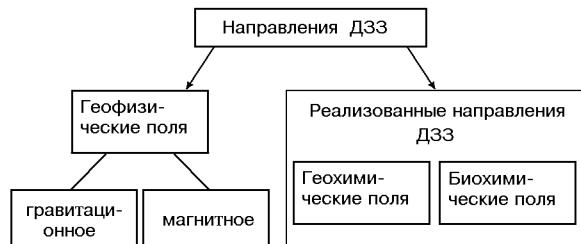


Рис. 1. Направления дистанционного зондирования Земли

Уточнение модели ГМПЗ автономными аэрокосмическими средствами может быть достигнуто путем разработки спутникового гравитационного градиентометра (СГГ) с погрешностями определения вторых производных гравитационного потенциала 10^{-2} — 10^{-3} Этв. Исследования, проведенные в ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» [3], показали принципиальную возможность создания СГГ на основе схем и технологий криогенных чувствительных элементов. Аналогичные исследования выполняются за рубежом в рамках программ «Aristoteles», «Step», «Geoid», которые приблизились к этапу проведения экспериментов на борту КА [1, 2, 9, 11—14].

В настоящее время при разработке перспективных градиентометров для научных исследований (в особенности космических), приборам традиционной конструкции на базе крутильных весов предпочтуют конструкции, базирующиеся на парах акселерометров [2, 11, 14].

По предварительной оценке, масса СГГ разработки ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» составит 80—90 кг, энергопотребление порядка 50 Вт. Следует отметить, что создание СГГ с пороговой чувствительностью на уровне 10^{-2} — 10^{-3} Этв является сложной технической проблемой мирового уровня. До настоящего времени в России не создано ни одного промышленного образца СГГ [9].

Проведенные в ЦНИИМаш [9] оценки возможности реализации проекта показали, что с технической точки зрения при соответствующем финансировании создание предлагаемого геофизического КА возможно в ближайшие 5-6 лет.

Задачу измерения гравитационного поля Земли (ГПЗ) в проекте GRACE (Германия) решают по данным точного позиционирования КА с помощью GPS и лазерной локации спутников. Для этого используется специально разработанный приемник «BlackJack», обеспечивающий точность определения координат 2-3 см. Параметры гравитационного поля Земли определяются по эволюции орбит КА.

Однако в проекте GRACE определение параметров гравитационного поля по изменению расстояния между двумя КА имеет тот недостаток, что использование только двух КА не дает возможности точно определить пространственное направление изменения взаимного положения. Отсюда возможны дополнительные погрешности в вычислениях.

Представляет, также, интерес изучение ГПЗ с помощью метода спутниковой альтиметрии.

Метод был предложен для океанографических исследований в начале 70-х годов, и первое его практическое применение началось с запуском спутников GEOS-3 в 1975 г. и SEASAT в 1978 г.

Полученные вследствие обработки данных спутниковой альтиметрии высоты уровня моря позволяют построить геоид как в глобальном, так и в региональном масштабах.

При обработке альтиметрических данных в измеренных высотах уровня моря производится учет влияния орбитальных и инструментальных ошибок, геофизических факторов (состояние моря, рефракция, гидрометеоры) и океанических вариаций (течения, ветры, приливы и т. д.). Далее исправленные альтиметрические данные уравновешиваются для того, чтобы получить однородный набор исходных данных. В процессе уравновешивания минимизируют расхождения между высотами уровня моря в точках пересечения подспутниковых трасс.

Спутниковая альтиметрия сегодня дает наиболее полную информацию о профилях геоида в акваториях Мирового океана. Кроме того, метод достаточно оперативен. В комбинации с наземными, спутниковыми, астрономо-геодезическими и гравиметрическими данными метод спутниковой альтиметрии позволяет определять высоты геоида над уровнем эллипсоида с сантиметровой точностью.

Основное уравнение спутниковой альтиметрии имеет вид

$$h = r_s - \rho - r_e ,$$

где h — геометрическая высота (SSH) поверхности океана над референц-эллипсоидом; r_s — радиальное расстояние до спутника, которое вычисляется из эфемерид, полученных по траекториям лучших орбит всех существующих альтиметрических спутников; ρ — известное «точное» расстояние от центра масс КА до поверхности океана; r_e — радиальное расстояние до подспутниковых точек на общеземном эллипсоиде.

На основе полученных методом спутниковой альтиметрии высот геоида с использованием методов коллокации и регуляризации рассчитываются численные значения поля аномалий силы тяжести [8].

Точность построения поля аномалий силы тяжести, полученного методом спутниковой альтиметрии, составляет 4–7 мГал [8].

В украинских системах ДЗЗ не предполагалось проводить исследования по геофизическим параметрам. Однако специалисты ГКБ «Южное» совместно со специалистами ИКИ и ЦАКИЗ на совещании в ГКБ «Южное» от 23.07.03 нашли такую возможность. Прежде всего представляет интерес изучение магнитного поля Земли и создание карты магнитных полей Украины по информации научной аппаратуры «Вариант» КА «Січ-1М» и магнитометра КА «Микроспутник».

Определение параметров гравитационного поля Земли с помощью лазерно-локационного метода с использованием лазерно-локационных станций (ЛЛС) и уголковых отражателей на борту КА «Січ-1М» не представляет особых технических проблем.

С помощью лазерно-локационного метода космических гравиметрических исследований определяются значения ускорения силы тяжести на поверхности референц-эллипсоида. В основе метода лежит зависимость высоты орбиты спутника от значения ускорения силы тяжести, которая вытекает из второго закона Ньютона и закона всемирного тяготения и заключается в равенстве силы притяжения и центробежной силы при движении КА по круговой орбите:

$$F_t = F_{\text{цб}},$$

или

$$mg_0 = m\omega^2 R = \frac{mV^2}{R},$$

где m — масса КА; g_0 — ускорение свободного падения; ω — угловая скорость движения КА по орбите; V — линейная скорость движения КА по орбите; R — радиус орбиты КА.

Отсюда значение ускорения свободного падения в любой точке орбиты равно

$$g_0 = \frac{V^2}{R},$$

а значение g в подспутниковой точке на референц-эллипсоиде —

$$g = \frac{g_0 R^2}{r_e^2}.$$

Разрешающая способность данного метода определяется из точности определения координат КА лазерно-локационным методом:

$$\Delta g = \frac{\partial g}{\partial r} \Delta R = \frac{2\mu}{R^3} \Delta R = \frac{2 \cdot 398604}{7040^3} 10^{-4} = \\ = 2.29 \cdot 10^{-10} \text{ км}/\text{с}^2 = 2.29 \cdot 10^{-7} \text{ м}/\text{с}^2,$$

где $\mu = gr^2 = 398604 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — гравитационная постоянная Земли, $R = 7040 \text{ км}$ — радиус орбиты КА, $\Delta R = 0.1 \text{ м}$ — приращение радиуса орбиты, фиксируемое ЛЛС.

Для решения задачи построения гравитационной карты с помощью лазерно-локационного метода требуются такие исходные данные:

- скорость движения спутника на орбите;
- текущий радиус орбиты спутника;
- текущее положение подспутниковой точки на референц-эллипсоиде;

- высота орбиты над референц-эллипсоидом.

Эти исходные данные рассчитываются по данным ЛЛС.

Для компенсации инструментальных погрешностей определения ускорения силы тяжести необходимо использовать юстировочный полигон, значения g на котором определены с максимальной возможной точностью. По результатам анализа отклонений измеренных значений от эталонных вводится необходимая поправка. По данным измерений ЛЛС рассчитываются значения ускорения свободного падения в подспутниковых точках.

Использование данных наземных измерений в совокупности с данными космических измерений ускорения свободного падения, приведенными к референц-эллипсоиду, даст возможность выявить аномалии, расположенные между поверхностью Земли и референц-эллипсоидом. В результате анализа этих аномалий могут быть выявлены признаки залегания полезных ископаемых, определены районы сейсмоактивности, и может быть установлена связь между аномалиями и психофизическим состоянием людей в этом районе.

Украина в настоящее время располагает возможностью отработки метода космических геофизических исследований на базе КА «Січ-1М» с использованием аппаратуры изучения магнитного поля Земли типа «Вариант», а также с использованием ЛЛС на базе телескопов ТПЛ (рис. 2). На Украине имеется шесть таких телескопов:

- 1 — Симеизская станция НИИ «Крымская астрономическая обсерватория» (Симеиз).
- 2 — Крымская лазерная обсерватория ГАО НАН Украины (Кацивели).
- 3 — Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени И. Франка (Львов — Брюховичи).
- 4 — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины (Киев).
- 5 — Государственный межвузовский центр «Орион» (Алчевск — Исаково).
- 6 — Лаборатория космических исследований Ужгородского национального университета (Ужгород — Деренивка).

Точность измерения дальности с помощью ЛЛС в основном определяется длительностью импульса лазера и параметрами импульса фотодумпножителя (ФЭУ), в первую очередь джиттером (нестабильность времени пролета электронов в ФЭУ).

На украинских станциях используются ФЭУ фирмы Hamamatsu и ФЭУ-79 (на станции Simeiz-1873), работающий с лазерными импульсами длительностью 0.3—0.4 нс.

Значения средней квадратичной погрешности (СКП) ЛЛС по результатам проведения измерений в нескольких сеансах

Станция	Количество сеансов	СКП, мм
Симеиз	14	44.75
Кацивели	5	29.5
Рига	24	43.72

В таблице приводятся значения средней квадратичной погрешности (СКП) ЛЛС по результатам проведения измерений в нескольких сеансах.

Видно, что данные измерений Симеиза и Кацивели вполне приемлемы. При этом, хотя в Риге работает лазер с современным ФЭУ с длительностью импульса около ста пикосекунд, результаты украинских станций одного с ним уровня [5].

В качестве юстировочного полигона можно использовать контрольно-калибровочный полигон Кацивели.

Перспективным вариантом реализации радиофизического метода изучения ГПЗ представляется выведение на геостационарную орбиту источника излучения с несущей частотой 35 ГГц и 45 ГГц на базе водородного стандарта, имеющего относительную стабильность частоты не хуже 10^{-15} . В этом случае, располагая приемник в нужной точке на поверхности Земли, можно определить в ней значение гравитационного потенциала. Такая система хорошо согласуется с перспективной европейской навигационной системой.

Оценку точности измерения силы тяжести радиофизическим методом проведем согласно принципу эквивалентности общей теории относительности:

$$\eta f = \eta f_0 - \frac{\eta gl f_0}{c^2} = \eta f_0 \left(1 - \frac{gl}{c^2}\right),$$

$$f = f_0 \left(1 - \frac{gl}{c^2}\right),$$

$$g = \frac{c^2}{l} \cdot \frac{\Delta f}{f_0},$$

где η — постоянная Планка, l — высота взаимного расположения излучателя и приемника, f_0 — частота источника излучения, f — принимаемая частота, c — скорость света.

Для круговой орбиты

$$k = \frac{c^2}{l} = \text{const.}$$

Следовательно, ускорение свободного падения зависит прямо пропорционально от относительного

изменения частоты:

$$g = k \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Точность определения значения g определяется точностью определения принимаемой частоты и будет не лучше, чем стабильность частоты источника излучения (10^{-15}).

В качестве наземных средств измерения возможно использование комплекса машин геофизического обеспечения 73П (комплекс МГО) разработки ГКБ «Южное», который оснащен аппаратурой спутниковой навигации на базе GPS и комплектом гравиметрической аппаратуры.

Дооснащение комплекса МГО дополнительными датчиками контактных измерений в составе наземной платформы сбора данных ДИПОС-1 позволит его использовать в качестве мобильной метеоэкологической станции.

В результате проведенного анализа необходимости и возможности создания космической системы ДЗЗ по геофизическим параметрам на базе КА «Січ-1М» и «Микроспутник» можно сделать следующее заключение. Космические исследования по геофизическим параметрам являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений ДЗЗ. Реализация лазерно-локационного метода гравиметрических измерений с помощью угловых отражателей, расположенных на борту КА «Січ-1М», и шести существующих на Украине лазерно-локационных станций:

- не требует доработки КА «Січ-1М»;
- не требует доработок ЛЛС;
- обеспечит определение ускорения силы тяжести над территорией Украины с точностью порядка 10^{-7} м/с^2 ;
- позволит создать высокоточные гравитационную и магнитную карты Украины;
- позволит реализовать комплексный метод ДЗЗ по геофизическим (ГКБ «Южное», ИКИ) и геохимическим параметрам (ЦАКИЗ, г. Киев) с целью определения месторасположения залежей полезных ископаемых, зон повышенной сейсмической активности и оценить степень воздействия геофизических полей на психофизическое состояние людей.

На рис. 3 в качестве примера показан результат совмещения снимков с КА «Океан-О» (с отмеченными линеаментами) с картой гравитационного поля (изолинии нанесены через 2 $\text{мкм}/\text{с}^2$)

1. Жернаков О. А., Егоров Д. А. Современное состояние и перспективы развития зарубежной гравиметрической техники // Гирроскопия и навигация.—1998.—№ 1 (20).—С. 35—47.

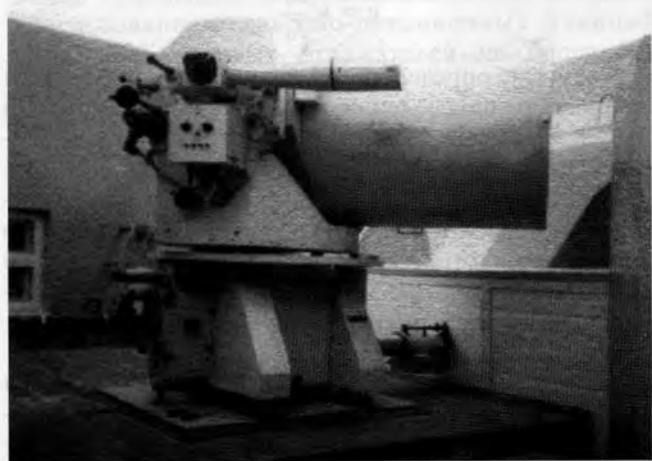


Рис. 2. Телескоп ТПЛ-1М

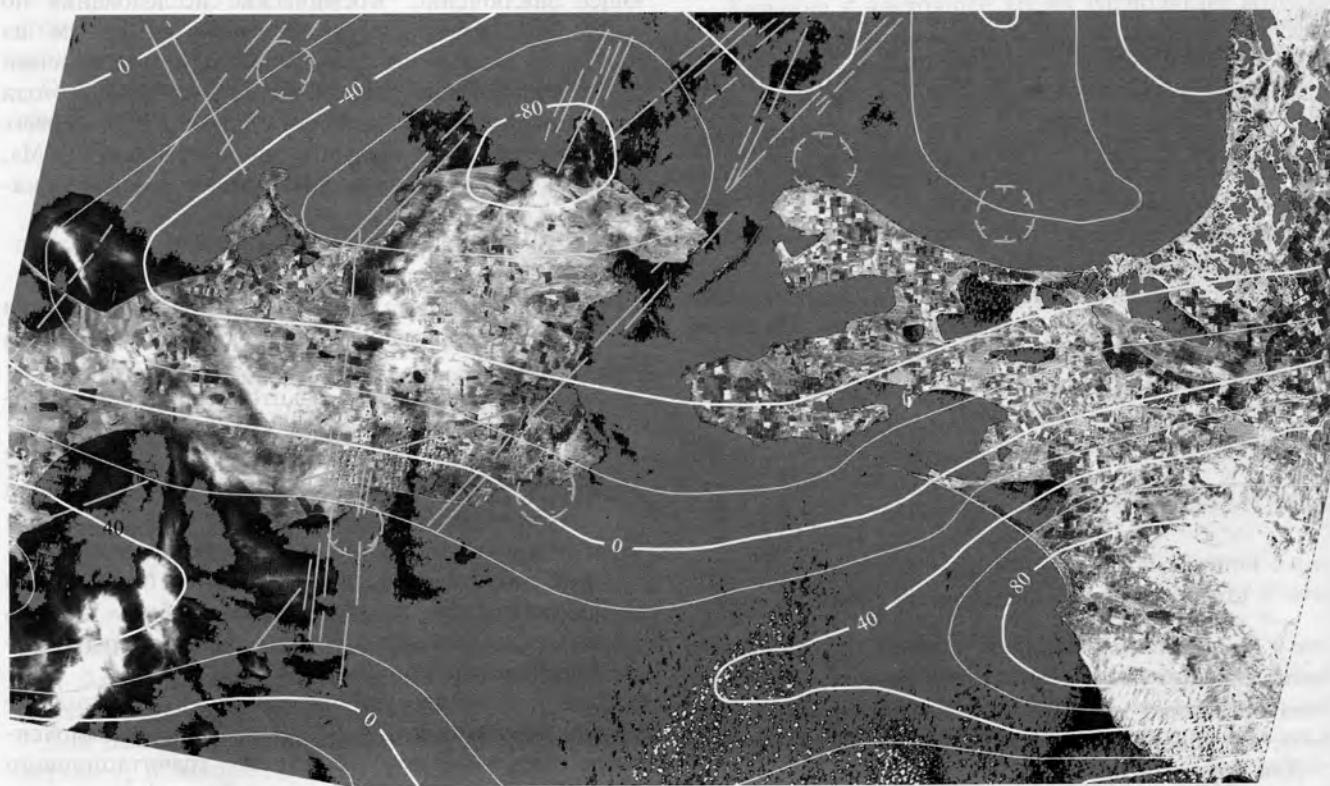


Рис. 3. Результат совмещения снимка с КА «Океан-О» с картой гравитационного поля

2. Жернаков О. А., Фрезинский В. С. Криогенные чувствительные элементы инерциальных навигационных систем: Обзор. — Л.: ЦНИИ «Румб», 1998.—200 с.
3. Жернаков О. А. Принципы создания спутникового гравитационного градиентометра // III-я Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке», 27—31 мая 2002 г., г. Королев, ЦНИИмаш. — Королев, 2002.—С. 115.
4. Зорькин Л. М., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. и др. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцевых геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле // Открытие № 234 от 24.07.80.
5. Минин О. А., Дмитроца А. И., Штирберг Л. С. О возможности получения сантиметровых точностей на ФЭУ-79 // Междунар. науч. конф. «Астрономическая школа молодых ученых». — Белая Церковь, 2003.—С. 29.
6. Перерва В. М., Костина Т. И. Прогнозирование зон развития вторичных коллекторов по спутниковым данным // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 197—200.
7. Перерва В. М., Левчик Е. И., Архипов А. И. и др. Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 187—197.
8. Тартачинская З. Р. Определение высот геоида и аномалий силы тяжести по данным спутниковой альтиметрии: Автoref. дис... канд. техн. наук: / Национальный ун-т «Львівська політехніка». — Л., 2002.—18 с.
9. Успенский Г. Р. Проект перспективного геофизического КА // III-я Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке», 27—31 мая 2002 г., г. Королев, ЦНИИ маш. — Королев, 2002.—Кн. 2.—С. 123.
10. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике — М.: Наука, 1985.—С. 80.
11. European Space Agency. The Solid-State Mission ARISTOTILES // Proc. of an International Workshop, Anacarpi, Italy, 23—24, 1991 / Ed. by C. Mattock. — European Space Agency Spec. Publ., 1991.—P. 13750.—(ESA SP-329).
12. Nereim R. S., Jekeli C., Kaula W. M. Gravity field determination and characteristics: Retrospective and prospective // J. Geophys. Res.—1995.—100, N B8.—P. 15053—15074.
13. Paik H. J. Superconducting gravity gradiometer on STEP // STEP — Testing the Equivalence Principle in Space: Proc. of an International Symp., Pisa, Italy, 6—8 April 1993 / Ed. by R. Reinhard. — European Space Agency, ESA WPP-115, 1996.—P. 321—334.
14. Rummel R. Geodesy with STEP // STEP — Testing the Equivalence Principle in Space: Proc. of an International Symp., Pisa, Italy, 6—8 April 1993 / Ed. by R. Reinhard. — European Space Agency, ESA WPP-115, 1996.—P. 320—321.

A COMBINED INVESTIGATION OF THE TERRITORY OF UKRAINE ON THE BASIS OF GEOPHYSICAL PARAMETERS WITH THE USE OF “SICH-1M” AND “MICROSPUTNIK” SPACE SYSTEMS

**A. V. Agarkov, A. L. Makarov, S. A. Matvienko,
A. V. Meleshko, Yu. A. Selivanov**

We consider the possibility of the use of “Sich-1M” and “Micro-sputnik” space systems for the Earth remote sounding with respect to geophysical parameters.

УДК 528.854:873.044.528.88

В. В. Паненко

Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, Сімферополь

О гибридных аналогово-цифровых методах обработки аэрокосмических изображений морской поверхности

Зроблено огляд основних робіт з відображення рельєсу морських хвиль на фотографічних і радіолокаційних зображеннях. Розроблено спеціалізовані прилади для обробки зображень методом оптичного фур'є-перетворення: когерентно-оптичний аналізатор зі світловодом, призначеним для зменшення спеклових шумів, імерсйна чарука, суміщена з фур'є-лінзою. Розроблено та виготовлено сканер для реєстрації просторових спектрів у полярній системі координат. Застосовано цифрові методи для розрахунку та корекції параметрів морських хвиль. Оброблено дані експедицій з аерозйомки морської поверхні в Чорному і Баренцовому морях. Досліджено супутникова зображення Охотського моря.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие аэрокосмических методов позволило получать информацию о морском волнении в глобальных масштабах [3, 5, 7] в виде оптических или радиолокационных изображений, что расширило возможности использования природных сред для навигации, разведки зон продуктивности Мирового океана и составления метеорологических прогнозов. Стали актуальными задачи оперативной обработки изображений с целью получения количественной информации о параметрах волнения [2, 4]. Для обработки изображений моря перспективно применение гибридных оптико-цифровых методов [11—13]. Вопросы получения количественной информации по изображениям должны также опираться на развитие теории отображения рельефа морских волн в изображениях [2—5, 11—14]. Возможность определения параметров морских волн по их изображениям основана на зависимости светового потока, идущего от поверхности моря, от уклонов разрешаемых элементов волн. В работе [14] показано, что не разрешаемые мелкие элементы морских волн оказывают усредняющее действие в эффектах отражения от морских волн света неба и Солнца. С целью совершенствования методов обработки были разработаны принципы сканирования пространственных спектров изображений в поляр-

ной системе координат [1]. Для реализации этих принципов был разработан сканер [12], управляемый от компьютера. Настоящая работа посвящена развитию техники обработки спектров изображений, вопросам преобразования и коррекции с использованием как аналоговой, так и цифровой техники.

КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-АНАЛИЗАТОР

На рис. 1 показана схема когерентно-оптического фурье-анализатора (КОА) в сходящемся пучке, которая удобна тем, что позволяет легко изменять масштаб спектра и при необходимости переходить к схемам пространственной фильтрации. Новым элементом в анализаторе является колеблющийся световод, который позволяет снижать спекловые шумы пространственных спектров. КОА содержит элементы: 1 — гелий-неоновый лазер, 2 — микроЭлектроника для ввода луча в торец световода, 3 — многомодовый световод, 4 — звуковой генератор, 5 — вибратор, 6 — микроЭлектроника, 7 — точечная диафрагма, 8 — диафрагма, 9 — фурье-линза, 10 — транспарант с изображением, 11 — выходная плоскость, 12 — регистрирующий элемент, в качестве которого в зависимости от цели обработки могут использоваться приборы: сканер с ФЭУ и

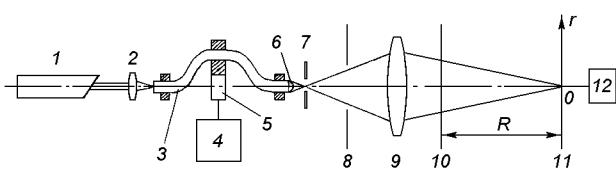


Рис. 1. Оптическая схема когерентно-оптического фурье-анализатора

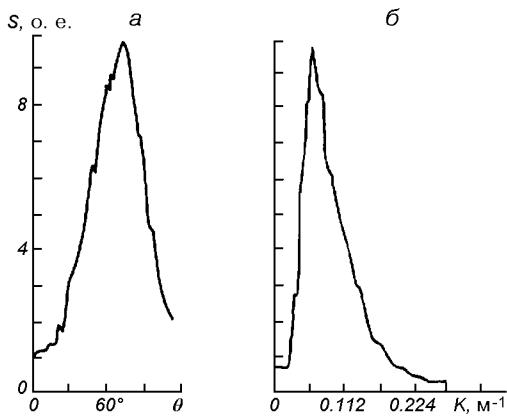


Рис. 2. Одномерные пространственные спектры изображений моря: *a* — угловой спектр, *б* — пространственно-частотный

АЦП, связанным с компьютером; цифровая телевизионная камера; цифровой фотоаппарат; графопостроитель Н-307. Свет лазера 1, проходя через световод 3, собирается микрообъективом 6 в точечное изображение в центре диафрагмы 7. Фурье-линза 9 строит изображение этого точечного источника в выходной плоскости 11. Свет, дифрагирующий на транспаранте, образует поля пространственного спектра, симметричные относительно центра. Они содержат спектральную характеристику поля морского волнения, которая может быть представлена одномерными спектрами, показанными на рис. 2. Одномерный угловой спектр (рис. 2, *a*) дает направление бега гармоник морских волн. Одномерный пространственно-частотный спектр (рис. 2, *б*) определяет распределение энергии в зависимости от пространственной частоты гармоник морских волн, максимуму кривой соответствуют гармоники энергонесущих волн. Для получения одномерных спектров в качестве выходного устройства 12 в КОА использовался сканер, который может сканировать лазерный свет в полярной системе координат. Он удобен для описания пространственных спектров, поскольку они имеют центральную симметрию. Сканер как многофункциональное оптическое устройство является необходимым прибором

при проведении исследовательских работ при использовании КОА. Внешний вид сканера показан на рис. 3, прибор изготовлен по нашей разработке и подробно описан в работе [12].

На рис. 4 показан двумерный пространственный спектр, полученный в КОА с вибрирующим многомодовым световодом. Даже при небольшом изгибе световода происходит случайное изменение амплитуд и фаз мод световода при сохранении когерентности света. При непрерывном, случайному колебанию световода в кольце вибратора 5 КОА, происходит снижение контраста спеклов, что хорошо видно на рис. 4. Измерения показали, что при частоте вибрации 100—300 Гц уровень спекловых шумов снижается в 5—6 раз. Рис. 2 и 4 относятся к эксперименту, который проводился в Баренцевом море и описан в работе [2]. Радиолокатор бокового обзора с горизонтальной поляризацией был установлен на борту самолета-лаборатории Ан-24. С высоты 1800 м на трассе полета 345 км справа от курса в полосе 15 км производилась фотoreгистрация сечения обратного рассеяния радиоволн на горизонтальной поляризации излучения и приема. На рис. 2 волновое число равно $K = 2\pi\Lambda^{-1}$, где Λ — длина волны гармоники морской волны. Для максимума кривой рис. 2, *б* длина энергонесущих морских волн равна 106 м. Используя дисперсионное соотношение для морского волнения $(g/K)^{1/2} = (0.8-9)W$ [15], можно оценить скорость ветра W . Расчет дает численное значение 13 м/с, что близко к 15 м/с по данным наземных измерений в районе эксперимента.

В работе [5] методом КОА были исследованы изображения периодических полей яркости в районе Охотского моря, полученные с ИСЗ «Метеор» бортовым комплексом МСУ-С. Чтобы получить пространственные спектры таких изображений пришлось применить длинно-базовый КОА с $R = 8$ м. Полученный спектр дал три системы волн с длиной 1.2, 1.9 и 3 км, что явилось полезной информацией для исследования явлений в том районе. Опыт показал, что КОА позволяет исследовать весьма сложные изображения.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОДНОМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Интерпретация спектров, полученных по изображениям моря, основывается на теориях отображения рельефа волн на фотографиях [10, 16]: интенсивность света, отраженного от элементарной площадки в направлении фотокамеры, зависит от наклона разрешаемых элементов волн: $u(x_0, y_0)_\phi = \Gamma(\beta)L(\varepsilon)$,

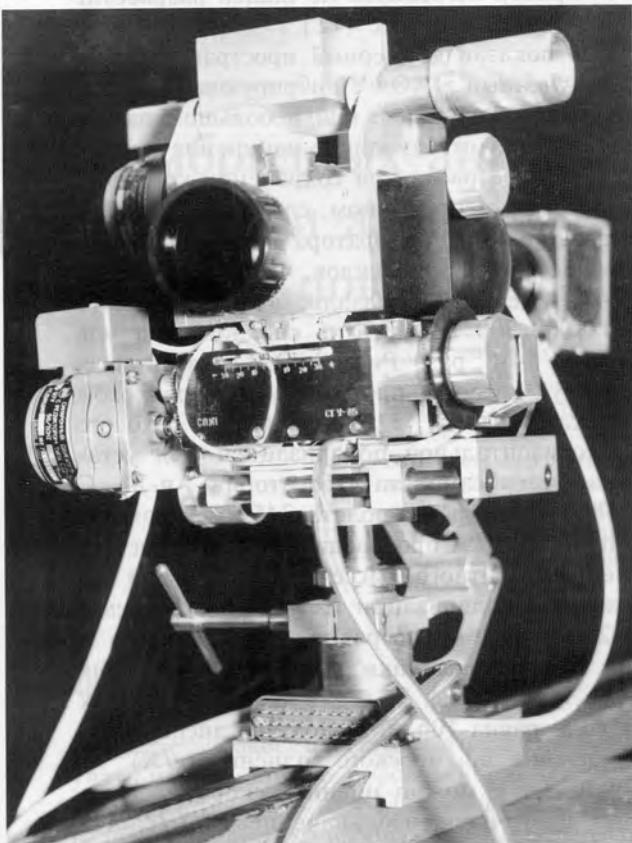


Рис. 3. Внешний вид сканера

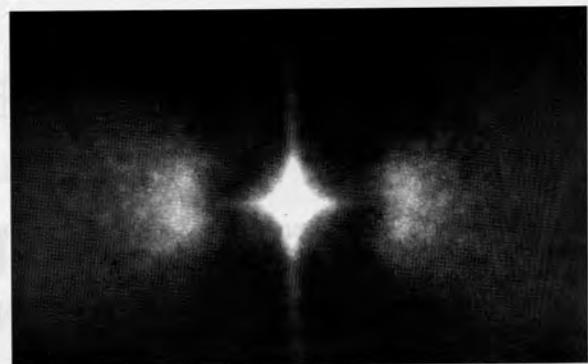


Рис. 4. Двумерный пространственный спектр радиолокационного изображения моря

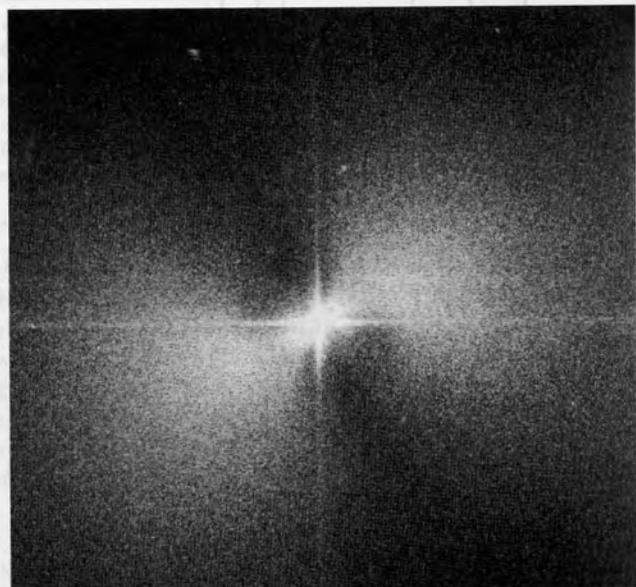


Рис. 5. Двумерный пространственный спектр оптического изображения моря (МКФ-6)

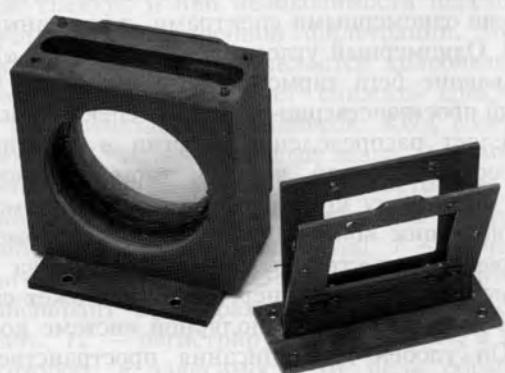


Рис. 6. Иммерсионная ячейка, совмещенная с фурье-линзой для снимков МКФ-6

где β — угол падения, а $\Gamma(\beta)$ — френелевский коэффициент отражения, $L(\varepsilon)$ — яркость неба, которая зависит от его состояния, ε — зенитный угол падающего луча. В теориях отображения, считая углы наклона волн малыми, разлагают функцию u в ряд относительно $\varphi = 0$ и в первом приближении ограничиваются двумя членами:

$$u(x_0, y_0) \approx u(x_0, y_0)_{\varphi=0} + [u_\varphi(x_0, y_0)]' \cdot \varphi, \quad (1)$$

где φ — угол между нормалью к площадке разрешения и осью z ; x_0 и y_0 — координаты горизонтальной плоскости. Из (1) следует, что яркость элементов волн пропорциональна их уклонам. В работе [3] показано, что модуляция сечения радиолокационного рассеяния при больших углах падения также обусловлена уклонами крупных волн.

Одной из наиболее важных задач спектрального метода морского волнения [6] является установление зависимости между спектром уклонов $S(k, \theta)$ и спектром высот $S_h(k, \theta)$. Здесь k — волновое число, θ — полярный угол, $h = z$ — высота. В рамках использованной линейной гидродинамической модели для стационарных волновых полей установлено, что справедливо приближенное соотношение $S(k, \theta) = k^2 \cdot S_h(k, \theta)$ [6], пользуясь которым можно преобразовать спектр уклонов в спектр высот $S_h(k, \theta) = S(k, \theta) \cdot k^{-2}$. Процедуру пересчета целесообразно выполнять с помощью компьютера, работая с массивами, полученными при сканировании.

Изображающие системы не идеальны. На качество изображений оказывает влияние слой атмосферы, вибрации аэрофотоаппарата, объектив и регистрирующий материал. Те факторы, которые имеют характер систематических ошибок (ФПМ объектива и фотопленки), можно учесть, и тем самым повысить точность информации, получаемой из анализа спектров. При аэрофотосъемке функция яркости $u(x_0, y_0)$, отображающая рельеф моря, трансформируется объективом в изображение $u(x, y)$, отображаемое фотопленкой. На основании теоремы о свертке можно показать, что корректированный спектр высот можно получить по формуле

$$S_h(k, \theta)_{\text{кор}} = S(k, \theta) \cdot (k \cdot H \cdot P)^{-2}, \quad (2)$$

где $S(k, \theta)$ — измеренный по фотографиям спектр уклонов волн, H — ФПМ объектива, P — ФПМ фотопленки.

На рис. 5 показан двумерный пространственный спектр, полученный по изображению Черного моря при фотографировании камерой МКФ-6 с высоты 3000 м в самолетном эксперименте. Видно, что на море наблюдалось сложное ветровое волнение. Длина энергонесущих ветровых волн составляла

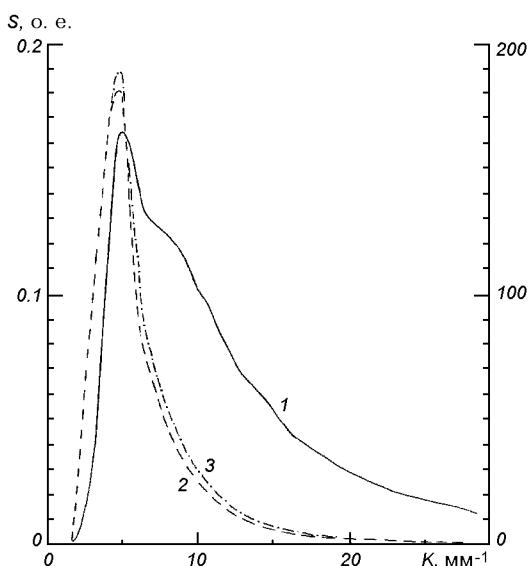


Рис. 7. Преобразование и коррекция одномерных спектров: 1 — спектр уклонов, 2 — спектр высот волн, 3 — спектр высот после коррекции на МПФ объектива и пленки

3 м, на спектре просматриваются волны зыби с большей длиной волны. Спектр был получен без подавления спектловых шумов, это видно на нем. Можно также сравнить этот спектр с показанным на рис. 2, при получении которого спектловые шумы подавлялись колебаниями световода. При получении одномерного спектра подавление спектлового шума в этом случае осуществлялось по методу цифровой медианной фильтрации по соответствующим программам. Кроме указанных методов подавления спектловых шумов, нами использовался еще метод иммерсионных жидкостей (авиационный керосин), при котором фотопленка помещается в жидкость с показателем преломления, примерно равным показателю преломления эммульсионного слоя. Специально для обработки снимков камеры МКФ-6 была разработана иммерсионная ячейка, совмещенная с фурье-линзой.

На рис. 6 показана такая ячейка, слева — корпус с окнами из двух половинок фурье-линзы, справа — кадровая рамка и держатель. Все металлические детали сделаны из титана; линзы вклеивались в корпус желатиновым клеем. Для того чтобы применить ячейку в КОА, нужно из схемы рис. 1 убрать элементы 3, 4, 5, 6 и заменить фурье-линзу 9 иммерсионной ячейкой с ее фурье-линзой. Результаты коррекции и преобразования спектров даны на примере спектра, показанного на рис. 5. Расчеты сделаны для пленки Тип 18 и объектива МКФ-6 «Пинатар», использовалась формула (2), простран-

ственная частота анализатора рассчитывалась по формуле $k = r(\lambda R)^{-1}$, где r — радиус в фурье плоскости, R — базис дифракции (рис. 1), λ — длина волны лазерного света.

Результаты расчета приведены на рис. 7, из которого видно, что все факторы влияют на функцию спектральной плотности $S(k)$. Кривая 1 на рис. 7 представляет собой одномерный пространственно-частотный спектр в масштабе КОА, соответствующий двумерному спектру, показанному на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше применения показывают высокую эффективность аналоговой техники в виде КОА. Скорости ввода и вывода в аналоговых и цифровых системах обработки изображений примерно одинакова. Цифровые системы проигрывают в скорости получения фурье-спектров. Если в КОА использовать пространственный модулятор типа свет-свет [8] для ввода изображений в реальном масштабе времени, то аналоговые системы по скорости обработки значительно превзойдут цифровые системы.

Опыт показывает также высокую эффективность аэрометодов для дистанционного измерения параметров волнения в регионах. Глобальную информацию о морском волнении в Мировом океане могут дать спутниковые системы. Реальное разрешение МКФ-6 при съемке с высоты 260—270 км составляет 20 м при контрасте 0.1 [9], что достаточно для регистрации изображений океанских волн [7].

Есть необходимость совершенствовать теорию отображения рельефа морских волн на фотографиях с учетом ФПМ слоя атмосферы между поверхностью моря и фотоаппаратом.

- Бондур В. Г., Паненко В. В. и др. Об оптимизации вида сканирования в задачах цифровой обработки пространственных спектров // Всесоюз. конф. «Микропроцессоры-85»: Тез. докл. 1985.—С. 30—31.
- Бункин Ф. В., Воляк К. И., Ляхов Г. А. и др. Трассовые измерения морского волнения самолетным радиолокатором бокового обзора // Исслед. Земли из Космоса.—1983.—№ 5.—С. 22—30.
- Воляк К. И. Определение характеристик волнения по радиоизображениям моря // Исслед. Земли из Космоса.—1982.—№ 6.—С. 86—94.
- Воляк К. И., Паненко В. В. и др. Точное определение параметров волн по данным фурье-анализа радиоизображений морской поверхности // Исслед. Земли из Космоса.—1986.—№ 4.—С. 11—20.

- Гришин Г. А., Гектин Ю. М., Селиванов А. С. и др. Исследование яркостной структуры спутникового изображения Охотского моря // Исслед. Земли из Космоса.—1983.—№ 5.—С. 3.
- Давидан И. Н., Лопатухин Л. Н., Рожков В. А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.—287 с.
- Егоров В. В. Арумов Г. П. Изучение пространственной структуры изображений земной поверхности // Многозональные аэрокосмические съемки Земли: Сб. ст. ИКИ АН СССР. — М.: Наука, 1981.—С. 235.
- Захаров И. С. Пространственно временные модуляторы света. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983.—264 с.
- Зиман Я. Л., Чесноков Ю. М. и др. Основные итоги эксперимента «Радуга» // Многозональные аэрокосмические съемки Земли: Сб. ст. ИКИ АН СССР. — М.: Наука, 1981.—С. 5—13.
- Мовчан В. Н., Деревянко В. Г. Направленные спектры взволнованной водной поверхности по фотографиям // Проблемы охраны окружающей среды. — Л., 1980.—С. 88—103.
- Паненко В. В., Брыляков И. А. Аналоговая и цифровая обработка двумерных пространственных спектров морского волнения // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров: Сб. докл. — М.: Гидрометеоиздат, 1986.—С. 96—100.
- Паненко В. В., Булатова О. В. Многофункциональное сканирующее устройство для оптических измерений с цифровым управлением и отсчетом сигнала // Оптико-мех. пром-сть.—1990.—№ 10.—С. 27—31.
- Паненко В. В., Булатова О. В., Опришко В. В. Многофункциональное сканирующее устройство для оптических измерений // Оптико-мех. пром-сть.—1986.—№ 4.—С. 30—32.
- Паненко В. В., Чуклов. В. А. Учет случайных параметров в вопросах отображения волн на фотографиях // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров: Сб. докл. — М.: Гидрометеоиздат, 1986.—С. 136—139.
- Филлипс О. М. Динамика верхнего слоя океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.—319 с.
- Kasevich R. S., Jang C. H., Heriksen S. W. Analysis and Optical Processing of Sea Photographs for Energy Spectra // IEEE Trans. Geosci. Electron.—1972.—10, N 1.—P. 51—57.

ON HYBRID ANALOGOUS-DIGITAL METHODS OF TREATMENT OF AEROSPACE IMAGES OF SEA SURFACE

V. V. Panenko

We give a review of fundamental works on the representation of the relief of sea waves on photographic and radar images. We developed some special-purpose instruments for image treatment with the use of optical Fourier transformation, namely, an immersion cell combined with a Fourier-lens and an optical analyser with vacillating light guide for decrease of speckle. A scanner for detection of spatial spectra in polar coordinate system is developed and constructed. Digital methods for calculation and correction of parameters of sea waves are applied. Some results of expeditions for the sea surface aerosurvey of the Black Sea and Barents Sea are processed. A space image of the Sea of Okhotsk is analysed.

581.133.1:535.361.2

С. М. Кочубей

Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

Оценка основных параметров сельскохозяйственных посевов по спектру отражения растительности в оптическом диапазоне

Показано, что спектральні криві відбивання рослинності містять достатню інформацію, щоб створити набір параметрів для ефективного контролю стану посівів сільськогосподарських культур. Для більшості з них використовується оцінка вмісту хлорофілу чи характеристики, що залежать від впливу внутрішньої структури листової тканини на відбивальну здатність листя в області поглинання хлорофілу. На прикладі озимої пшениці запропоновано новий хлорофільний індекс для оцінки вмісту хлорофілу в листках на основі кількісного параметра форми спектральної кривої відбивання. Ним є відношення двох максимумів у графіку першої похідної від спектральної кривої відбивання в області $\lambda\lambda$ 680—750 нм, яке корелює із вмістом хлорофілу. Використання фізичної, графічної і математичної моделей дозволило оцінити стійкість результатів обчислення концентрації хлорофілу із застосуванням вказаного хлорофільного індексу до впливу відбивання ґрунту. Показано, що відношення двох максимумів в графіку першої похідної змінюється не більш ніж на 5 % і 11 % при проективному покритті 50 % и 25 % відповідно, на фоні темного ґрунту чи піску. Коєфіцієнт відбивання на $\lambda = 550$ нм корелює з вмістом хлорофілу і загального азоту, але виявляє чутливість до вмісту вологи в листках. Він також чутливий до вкладу відбивання від ґрунту. Тому комбінаторні оцінки хлорофілу, отримані за допомогою кількісного параметра, що характеризує форму спектру в області червоного краю, і коєфіцієнта відбивання $\lambda = 550$ нм, дають можливість оцінювати величину проективного покриття для незімкнутих посівів, або вміст вологи в листках у зімкнутих посівах.

ВВЕДЕНИЕ

Использование дистанционного тестирования состояния агроценозов привлекательно как эффективный инструмент контроля и управления этим видом природных ресурсов. Создание адекватной системы мониторинга посевов сельскохозяйственных культур требует разработки методов оценки их основных характеристик, а также разработки аппаратуры для инструментальной реализации этих методов. Эффективность системы увеличивается, если одно и то же устройство способно контролировать несколько различных параметров.

Содержание хлорофилла в листьях высших растений является важной характеристикой их состоя-

ния. Следовательно, дистанционное определение этого показателя может быть использовано для создания набора методов тестирования состояния посева. Спектры отражения листьев растений в оптическом диапазоне являются наиболее информативными относительно содержания хлорофилла, вследствие того, что они обусловлены специфическими спектральными свойствами этого пигмента. Кроме того, эти спектры являются удобной характеристикой для дистанционных измерений и имеют высокий информативный потенциал. В настоящее время стало ясно, что именно спектры отражения, но не коэффициенты яркости, являются наиболее перспективными показателями, пригодными для создания системы мониторинга растительности.

Этим, очевидно, обусловлен большой интерес к исследованиям с применением дистанционной гиперспектральной изображающей аппаратуры, а также по спектральным характеристикам растительности.

Известны некоторые спектральные параметры, коррелирующие с содержанием хлорофилла. К их числу относятся положение так называемого красного края в спектрах отражения (область $\lambda = 680 - 800$ нм) [1, 6, 8] и отношение интенсивностей в двух максимумах в графике первой производной от спектральной кривой в области красного края [2, 3, 7, 10].

Основные характеристики сельскохозяйственных посевов, важные для оценки их состояния, следующие: содержание хлорофилла, общего азота и влаги в листьях, проективное покрытие. Ниже будут приведены данные, демонстрирующие информативные возможности различных параметров спектральных кривых отражения листьев озимой пшеницы в отношении физиологических характеристик, необходимых для оценки состояния посевов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Листья растений озимой пшеницы, выращенных в полевых условиях, использовали для проведения спектральных измерений. Вариации содержания хлорофилла были обусловлены различиями минерального питания и возрастом растений. Спектры отражения измерены на спектрофотометре СФ-10, снабженном интегрирующей сферой. Система регистрации была модифицирована с тем, чтобы получать спектры в цифровом виде. Их регистрировали в диапазоне $\lambda = 400 - 750$ нм с шагом 1 нм. Части листьев, спектры отражения которых были записаны, затем использовали для определения хлорофилла химическим методом [5].

Эксперименты с изменением влагоемкости листьев проводили по следующей схеме. Измеряли спектры отражения листьев пшеницы. Затем взвешивали листья каждого образца, использованного для записи спектральной кривой. Листья каждой пробы помещали в цилиндры с водой, так что только нижняя часть листьев с открытыми проводящими пучками была погружена в воду. Цилиндры закрывали крышками и оставляли на 12 ч в темном прохладном месте. Такая процедура позволяет осуществить 100 %-ю влагоемкость листа. После этого листья каждой пробы взвешивали, записывали спектры отражения, каждую пробу высушивали в термостате и взвешивали для определения массы сухих листьев.

Изучение влияния величины проективного покрытия на спектры отражения проводили с использованием физических, графических и математических моделей, которые осуществляли следующим образом. Проективное покрытие 100 % и 50 % в физических моделях было достигнуто, когда поверхность измерительной кюветы была полностью или наполовину закрыта листьями. Черную почву или песок использовали в качестве подложки. В графической модели проективное покрытие 50 % было представлено как полусумма спектральных кривых отражения листьев и подложки. Проективное покрытие 25 % моделировалось как сумма спектров листьев и подложки, первый из которых умножали на 0.25, а второй на 0.75.

Спектральное распределение света, отраженного от системы почва-растительность, представляли следующим уравнением:

$$R_{n-p}(\lambda) = R_p(\lambda)k + (1 - k)(a\lambda + b),$$

где $R_{n-p}(\lambda)$ — коэффициент отражения системы почва-растительность, $R_p(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения растительности, k — проективное покрытие. Спектры отражения почвы близки к прямой линии, поэтому они смоделированы функцией $a\lambda + b$.

Первая производная от функции $R_{n-p}(\lambda)$ записывается в виде

$$dR_{n-p}(\lambda)/d\lambda = k dR_p/d\lambda + (1 - k)a. \quad (1)$$

Пусть I_2 и I_1 — значения первой производной для двух длин волн, λ_2 и λ_1 , тогда их отношение определяется следующим уравнением:

$$(I_2/I_1)_{n-p} = \left[[kI_2^p/(1 - k)] + a \right] : \left[[kI_1^p/(1 - k)] + a \right], \quad (2)$$

где I_2^p и I_1^p — значения первой производной спектра листьев, т. е. спектра, соответствующего 100 %-му проективному покрытию. Можно видеть, что отношение значений первой производной для двух различных длин волны зависит от проективного покрытия и крутизны нарастания функции спектрального распределения отражения почвы. Измерив I_2^p и I_1^p для конкретных спектральных кривых, а также определив a по графику первой производной от спектра отражения того или иного типа почвы, можно проследить за изменениями величины $(I_2/I_1)_{n-p}$ при различных значениях k , т. е. при различном проективном покрытии.

Обработка данных. Как было показано нами ранее [7], уровень шумов, свойственный нашему спектрофотометру, позволяет использовать формулу Савицкого—Голай для вычисления производной

без предварительного сглаживания спектральных кривых. Использовалась формула с 9-точечным подвижным окном и аппроксимацией спектральной кривой полиномами второй степени [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение спектров отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла выявило зависимость формы спектра в области красного края ($\lambda = 680$ — 750 нм) от содержания пигмента. На рис. 1, а показаны такие спектры. Видно, что кривизна спектральной кривой в этой области увеличивается с уменьшением содержания хлорофилла. В качестве количественного показателя формы спектральной кривой использовали отношение интенсивностей в двух основных максимумах графика первой производной (I_2/I_1). Представленные на рис. 1, б данные демонстрируют четкую зависимость указанного отношения от содержания пигмента. Величину I_2/I_1 и концентрацию хлорофилла удается связать уравнением линейной регрессии и таким образом получить формулу для расчетов содержания пигмента по спектральным

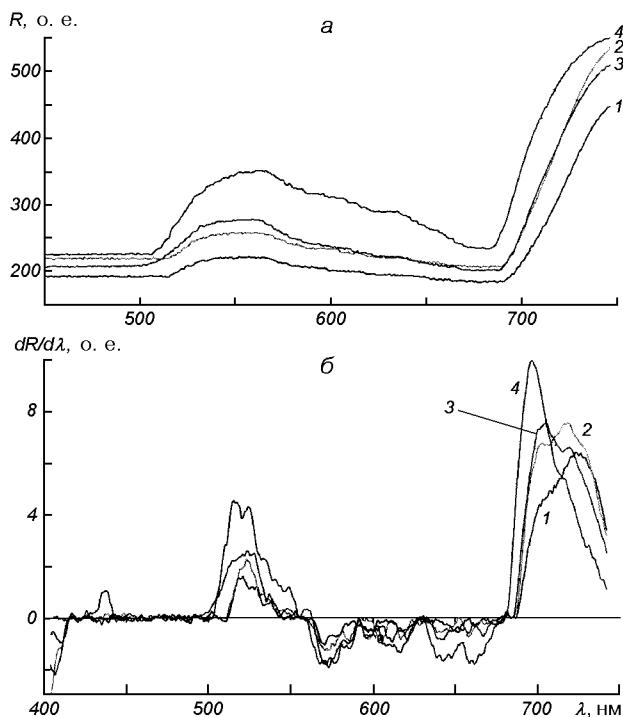


Рис. 1. Спектры отражения (а) и их первые производные (б) для листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла: 1, 2, 3 и 4 — концентрация хлорофилла 9.3; 6.6; 4.1 и 1.5 мг/дм² соответственно

характеристикам. Коэффициент корреляции равен 0.97.

Была проверена чувствительность I_2/I_1 к вкладу отражения от почвы, которое вносит существенные искажения в спектр отражения растительности при измерениях несокрученных посевов. Для проверки влияния отражения почвы на информативность предложенного спектрального показателя были проведены исследования на моделях с использованием в качестве подложки почв с наиболее сильным и наиболее слабым отражением, песка и чернозема соответственно. Такие измерения были проведены для листьев с высоким и низким содержанием пигмента. Значение изменений интенсивностей двух максимумов первой производной, I_2 и I_1 , а также их отношение, определенные с использованием различных моделей, показаны в табл. 1. Сравнение изменений величин I_2/I_1 и коэффициента отражения в зеленом максимуме, R550 показано в табл. 2. Из табл. 1 следует, что снижение величины проективного покрытия вызывает уменьшение I_2 и I_1 , которое оказывается большим при использовании математической и графической моделей по сравнению с физической. Изменение отношения I_2/I_1 практически одинаково при использовании всех моделей. Оно невелико, максимальное отличие не более 8 и 10 % в условиях 25 %-го проективного покрытия на светлой почве при высоком и низком содержании хлорофилла соответственно (табл. 2). Коэффициент отражения на длине волны $\lambda = 550$ нм для случая проективного покрытия 25 % может изменяться и на 145 %, как это

Таблица 1. Влияние отражения почвы на форму графика первой производной от спектральной кривой отражения системы «почва — растительность»

Значение проективного покрытия, %	Модель	I_1	I_2	$K = I_2/I_1$	K_{100}/K_n
Темная почва, концентрация хлорофилла 6.8 мг/дм ²					
100		5.18	6.37	1.23	1.00
50	физическая	4.57	5.48	1.20	1.02
	математическая	2.71	3.30	1.22	1.01
	графическая	2.78	3.35	1.20	1.02
25	математическая	1.47	1.77	1.20	1.02
	графическая	1.60	1.88	1.17	1.05
Светлая почва, концентрация хлорофилла 9.3 мг/дм ²					
100		5.20	8.08	1.55	1.00
50	физическая	4.35	6.38	1.47	1.05
	математическая	2.77	4.17	1.50	1.03
	графическая	2.80	4.15	1.48	1.05
25	математическая	1.55	2.27	1.46	1.06
	графическая	1.53	2.21	1.43	1.08

Таблица 2. Сравнение влияния отражения почвы на различные спектральные характеристики системы «почва — растительность»

Значение проективного покрытия, %	$K = I_2/I_1$	K_{100}/K_n	R_{550} , %	R_{100}/R_n
Темная почва, концентрация хлорофилла 6.8 мг/дм ²				
100	1.23	1.00	10.3	1.00
50	1.20	1.02	8.8	1.17
25	1.17	1.05	6.9	1.49
Светлая почва, концентрация хлорофилла 9.3 мг/дм ²				
100	1.55	1.00	10.3	1.00
50	1.48	1.05	14.0	0.73
25	1.43	1.08	17.9	0.57
Темная почва, концентрация хлорофилла 1.5 мг/дм ²				
100	0.54	1.00	26.7	1.00
50	0.53	1.02	16.1	1.66
25	0.56	0.96	10.9	2.45
Светлая почва, концентрация хлорофилла 1.5 мг/дм ²				
100	0.54	1.00	26.7	1.00
50	0.57	0.95	23.5	1.14
25	0.60	0.90	21.9	1.23

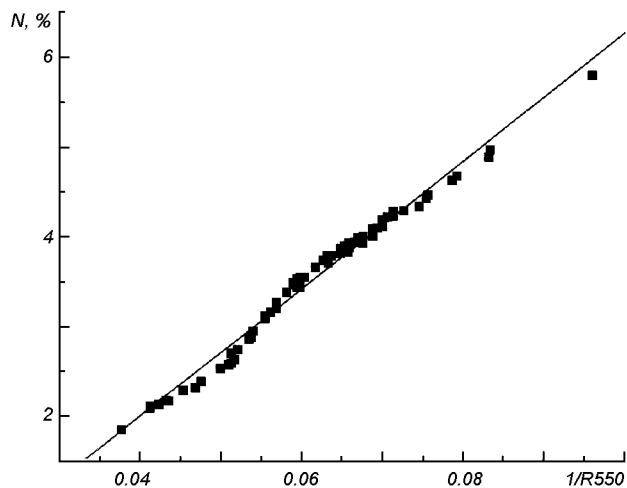


Рис. 2. Зависимость величины $1/R_{550}$ от содержания общего азота в листьях озимой пшеницы, точки — эксперимент, сплошная линия — линейная аппроксимация

наблюдается для варианта с низким содержанием хлорофилла на фоне темной почвы. Для 50 %-го проективного покрытия изменения R_{550} составляют от 14 до 66 % в зависимости от содержания хлорофилла и типа почвы (табл. 2).

Таким образом, параметр, представляющий собой отношение интенсивностей двух основных максимумов на графике первой производной, оказывается устойчивым к вкладу отражения почвы и

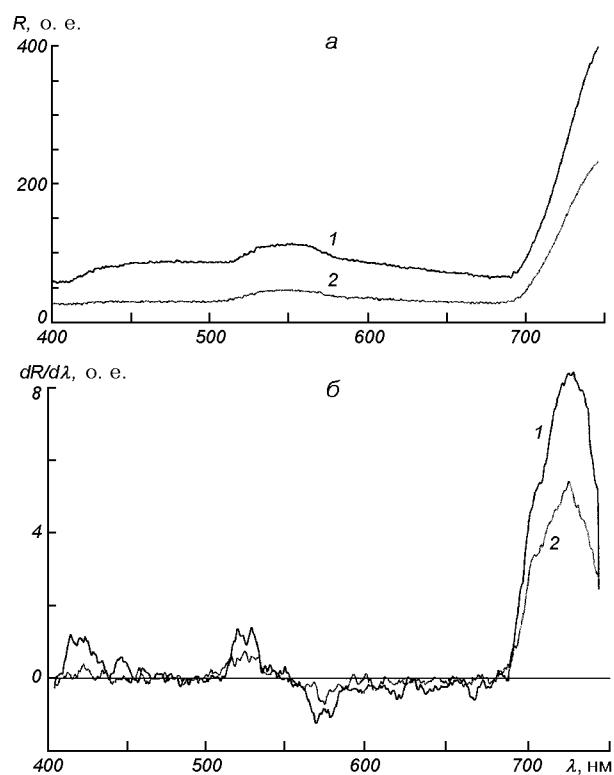


Рис. 3. Спектры (а) и их первые производные (б) для листьев с разным содержанием влаги: кривые 1 — исходные листья, 2 — пропитанные водой до 100 % влагоемкости

позволяет определять один из основных физиологических параметров растительности — содержание хлорофилла в системе «почва—растительность» — с точностью не хуже чем 10 % в условиях 25 %-го проективного покрытия на фоне любой почвы, независимо от содержания хлорофилла.

Коэффициент отражения R_{550} оказался чувствительным к содержанию общего азота в листьях. Эти параметры можно связать уравнением линейной регрессии

$$C_N = A/R_{550} - B.$$

Зависимость между содержанием общего азота и R_{550} показана на рис. 2. Коэффициент корреляции 0.93. Зависимость R_{550} от вклада отражения почвы делает эту формулу пригодной только для сомкнутых посевов. Для несомкнутых можно использовать установленную нами ранее [3] корреляционную связь между концентрациями хлорофилла и азота в листьях и использовать формулу для определения пигмента по отношению интенсивностей в максимумах графика первой производной. Эти результаты дают возможность оценки параметра, важного для тестирования состояния агроценозов, поскольку

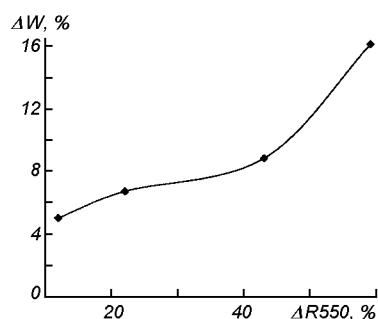


Рис. 4. Изменения коэффициента отражения при $\lambda = 550$ нм в зависимости от изменений содержания влаги в листьях озимой пшеницы

обеспеченность азотным питанием непосредственно связана с урожайностью, по крайней мере для зерновых культур.

На рис. 3, *a* показаны спектры отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием влаги. Видно, что величина отражения влажного листа уменьшается во всем спектральном диапазоне. При этом форма спектральной кривой в области красного края спектра практически не изменяется. Это наглядно демонстрируют графики первой производной, показанные на рис. 3, *b*. Величина отношения интенсивностей в максимумах равна 1.56 и 1.60 для исходного листа и со 100 % влагоемкостью соответственно. При расчете концентрации хлорофилла по полученному уравнению регрессии такая разница отношений максимумов дает различие в 3 %. Масса листа в эксперименте, данные которого приведены на рис. 3, возросла на 16 % при увеличении влагоемкости до 100 %, а коэффициент R_{550} уменьшился при этом в 2.4 раза. Изменения R_{550} в зависимости от вариации содержания влаги в листьях озимой пшеницы показаны на рис. 4.

дискуссия

Полученные результаты показывают, что количественный параметр формы спектральной кривой отражения листьев в области красного края ($\lambda \lambda 650$ —680 нм) является показателем, устойчивым к таким помехам, создаваемым объектом измерения как вклад отражения почвы в системе почва-растительность и вариациями влаги в листьях. Причем устойчивость наблюдается в широких пределах вариаций искажающих факторов, например, снижение проективного покрытия до 25 % на фоне сильно отражающей почвы и при низком содержании хлорофилла или повышении влагоемкости ли-

ста до 100 %. Если пользоваться широко распространенными в практике дистанционных измерений уравнениями, включающими коэффициенты яркости, то информация о содержании пигмента значительно искажается уже при проективном покрытии 50 % и значениях концентрации хлорофилла ниже 5 мг/дм², в особенности на светлых почвах. Таким образом, свойство высокой устойчивости предлагаемого нового хлорофильного индекса обеспечивает возможность его использования для оценки содержания пигмента при работе с практически любым типом системы почва-растительность и указывает на высокую эффективность этого параметра в отличие от коэффициентов яркости или их комбинаций. Следует также отметить, что указанный подход не выдвигает достаточно жестких требований к эталонам отражения и не нуждается в проведении калибровки по энергетическим параметрам отражения.

Величина коэффициентов отражения листьев, в частности в области зеленого максимума $\lambda = 550$ нм, оказывается чувствительной к ряду параметров системы почва-растительность, таких как концентрация хлорофилла, влаги и общего азота в листьях, а также к величине проективного покрытия и отражательным характеристикам почвы. Первые два биохимических компонента уменьшают величину R_{550} , третий ее увеличивает. Направленность и величина изменений R_{550} при неполном проективном покрытии зависит от отражательных характеристик почвы (табл. 2). Как показали наши исследования [3], основное определяющее влияние на величину R_{550} оказывает концентрация хлорофилла. Корреляционная связь между содержанием хлорофилла и общего азота [4], очевидно, является причиной того, что величина R_{550} чувствительна к содержанию азота в листьях. Можно также предположить, что связь между этими параметрами обусловлена не только вариациями содержания пигмента, но и спецификой рассеяния света на клеточных и иных компонентах структуры листовой ткани, на которые может влиять содержание азота. Чувствительность R_{550} к содержанию влаги можно отнести к проявлению влияния листовых структур на формирование сигнала отражения при $\lambda = 550$ нм. Действительно, вода не имеет в этой области полос поглощения и уменьшение R_{550} при увеличении содержания влаги можно объяснить только за счет увеличения рассеяния на клеточных структурах при заполнении клеток водой.

Располагая двумя параметрами спектральной кривой отражения листьев, чувствительными к содержанию хлорофилла, один из которых устойчив к влиянию внешних факторов, а другой, напротив, очень чувствителен, можно попытаться разработать

методы оценки значений этих «помех», которые, в свою очередь, являются важными параметрами системы почва-растительность. В частности, представляется возможным оценивать величину проектного покрытия, сравнивая результаты определения содержания хлорофилла по I_2/I_1 и R550. Аналогичным образом можно пытаться оценить уровень содержания влаги в листьях для сомкнутых посевов, т. е. при отсутствии помехи, создаваемой отражением почвы.

Полученные в работе результаты указывают на возможность разработки набора параметров на основе спектральной кривой отражения листьев в видимом диапазоне для тестирования основных физиологических характеристик для определения состояния фитоценозов. Это обстоятельство открывает возможность более простой приборной реализации системы дистанционного мониторинга состояния агроценозов, поскольку основные параметры для тестирования можно получить, используя не очень широкий спектральный диапазон, приблизительно от $\lambda = 500$ до $\lambda = 800$ нм, что легко реализуется в одном спектральном приборе.

1. Жумар А. Ю. Исследования влияния параметров растительности на положение максимального наклона красного края // Исслед. Земли из космоса.—1990.—4.—С. 15—20.
2. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Количественный анализ формы спектральной кривой отражения листьев растений как способ тестирований их состояния // Физиология и биохимия культурных растений.—1988.—20.—С. 535—539.
3. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
4. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ, Український фітосоціологічний центр, 2001.—219 с.
5. Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* // Plant Physiol.—1949.—24.—Р. 1—15.
6. Demetriodes-Shan T. H., Steven M. D., Clark J. A. High resolution derivative spectra in remote sensing // Rem. Sens. Environ.—1993.—33.—Р. 55—64.

7. Kochubey S. M., Biduk P. I. Novel Approach to Remote Sensing of Vegetation // Proc. of SPIE. Int. Conf. «AeroSence. Technologies and Systems for Defence Security», 21–25 April 2003, Orlando USA. — 5093.—Р. 373—378.
8. Miller J. R., Hare E. W., Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. 1. An inverted Gaussian reflectance model // Int. J. Rem. Sens.—1990.—11.—Р. 1755—1773.
9. Savitzky A., Golay M. G. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Analyt. Chem.—1964.—36.—Р. 1627—1639.
10. Zarko-Tejada P. J., Miller J. R., Mohammed G. H., et al. Vegetation stress detection through chlorophyll a+b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery // J. Environ. Qual.—2002.—31.—Р. 1433—1441.

ESTIMATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL CROPS FROM REFLECTANCE SPECTRUM OF VEGETATION IN THE OPTICAL RANGE

S. M. Kochubei

Reflectance spectra of vegetation are shown to contain sufficient information for developing a set of parameters to control effectively a status of agricultural crops. Most of the parameters can be based on chlorophyll estimation or on the other characteristics depending on influence of inner structure of leaf tissue on the leaf reflection in the chlorophyll absorption range. A novel chlorophyll index based on a quantitative characteristic of the shape of reflectance spectral curve is proposed for chlorophyll content estimation in winter wheat leaves. The index is a ratio of intensities in two main maxima in the first derivative plot from reflectance spectrum curve in a range of 680—750 nm. The ratio correlates with chlorophyll content. Application of physical, graphic and mathematical models allowed us to test the stability of chlorophyll estimations by the proposed novel chlorophyll index in relation to contribution of soil reflectance. The ratio of two maxima in the first derivative plot is shown to be changed no more than 5 and 11 % when 50 and 25 % projective covering took place and dark soil or sand are used as a background. Coefficient of reflection at 550 nm correlates with chlorophyll and total nitrogen content, but it shows sensitivity to leaf moisture and to the contribution of soil reflection. Therefore, the combinatorial estimations of chlorophyll derived with quantitative parameter of the shape of reflectance spectral curve and coefficient of reflection at 550 nm give the possibility to estimate the value of projective covering for dense sowing or to estimate moisture for undense sowing.

УДК 502:330.15

В. В. Макаренко, О. А. Колодяжний

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Геопросторовий аналіз картографічних даних та інформації ДЗЗ для відслідкування змін та прогнозування зсувонебезпечності

Показані переваги сумісного використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та географічних інформаційних систем (ГІС), а також засобів моделювання для дослідження складних процесів в навколошньому природному середовищі, запобігання надзвичайним ситуаціям природного характеру та ін. Відпрацьований повний технологічний цикл від обробки даних ДЗЗ та проведення геопросторового та багатокритеріального аналізу до публікації тематичної просторово-розподіленої інформації на прикладі Закарпаття. Космічні знімки та архівні топографічні карти використані для відслідкування змін в земному покриві та аналізу можливого впливу їх на розвиток зсувних процесів. На основі оцінки стану зсувів та факторів впливу на їхній розвиток побудована карта зсувонебезпечності Закарпаття та визначено напрямки подальших робіт.

Небезпечні природні явища, до яких належать повені, зсуви та ін. займають значне місце у науково-прикладному використанні даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). До основних задач тут відносяться питання організації спостережень, оцінки стану, прогнозування та управління. Основні переваги використання засобів та методів ДЗЗ такі [5].

1. Можливість отримання об'єктивних, постійно поновлюваних даних, які можуть використовуватись для широкого кола задач.

2. Можливість проведення зйомок великих територій швидко та з необхідною періодичністю.

3. Усуваються проблеми важкодоступності досліджуваних територій.

4. Знімки надають просторову перспективу, якої немає у наземних спостереженнях.

5. Швидше та дешевше отримання та інтерпретація інформації, ніж при наземних обстеженнях.

Дані ДЗЗ використовуються безпосередньо для інтерпретації та розробки застосувань, створення тематичних карт та поновлення наявних, а також в географічних інформаційних системах (ГІС) разом з необхідними наземними даними і засобами

моделювання для вирішення тематичних задач, а також засобами розповсюдження для інформування органів управління, громадськості тощо.

До основних характеристик ГІС можна віднести [4]:

- на відміну від можливих інших інформаційних систем — це комп'ютерні системи;
- ГІС може оперувати будь-якою інформацією про географічно прив'язані об'єкти;
- ГІС встановлює просторовий взаємозв'язок між різномінічними даними, отриманими з різних джерел;
- вміщує широке коло функцій аналізу.

Застосування математичних методів і моделей зумовлене широкою різноманітністю і складністю задач, пов'язаних з небезпечними природними явищами, великими об'ємами інформації, часто неповної і не завжди достовірної, різноманітними потребами потенційних користувачів.

При виборі математичних моделей необхідно виходити з принципів [1]:

1. З усіх моделей, які описують процес, повинна бути вибрана найпростіша, адекватна повноті і достовірності наявної інформації.
2. Моделі вибираються під процеси, а не навпаки.

При розробці моделей необхідно враховувати їхню еволюційність, тобто вони повинні змінюватися у відповідності до збільшення інформації про систему. Також може змінюватися необхідний рівень точності опису системи моделлю.

Після великих паводків у Закарпатті в листопаді 1998 р. та березні 2001 р., катастрофічної активізації повенево-зсувних та селевих процесів карпатська тематика викликає постійний інтерес. Виконано та започатковано велику кількість програм і проектів, у тому числі міжнародних. На жаль відсутність повної та достовірної інформації про земний покрив і фактори впливу на розвиток надзвичайних ситуацій, а також про їхні довготривалі зміни значно ускладнюють прогнозування, особливо на регіональному або басейновому рівні.

У 2001 р. на замовлення Мінекоресурсів та РНБО України спеціалістами Інституту космічних досліджень (ІКД) НАНУ—НКАУ та Українського центру менеджменту Землі і ресурсів (УЦМЗР) виконувались роботи по вивченням змін лісового покриву в Закарпатті та можливого впливу на розвиток зсувів [2]. Була визнана необхідність визначення можливостей поширення часових рамок щодо змін лісового покриву, залучення до аналізу додаткових факторів впливу на розвиток зсувних процесів та подання результатів для забезпечення широкого доступу до них. Роботи в цих напрямках були продовжені в ІКД НАНУ—НКАУ.

Метою даної роботи було визнано розробку та тестування на прикладі Закарпаття методики сумісного використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), сучасних та архівних топографічних карт, засобів географічних інформаційних систем (ГІС) та математичного моделювання для відслідкування змін в земному покрові, вивчення факторів впливу та прогнозування розвитку зсувних процесів.

В результаті аналізу архівних карт була встановлена наявність паперових карт різних частин Закарпаття за періоди 1930—1940-х, 1950—1960-х та 1970-х років. Карти тестової ділянки Закарпаття з великою кількістю зсувів поблизу м. Рахів були відскановані та геоприв'язані по сучасній цифровій топографічній карті масштабу 1 : 200 000. Створені тематичні шари територій, вкритих лісом на 1944, 1961 та 1976 рр. Сучасні карти лісового покрову були отримані на основі обробки знімків космічного апарату «Landsat» за 1988 та 2000 рр.

З рис. 1 видно, що велика кількість зсувів виникла в місцях змін лісового покриву. Слід відмітити, що цього фактора, навіть з урахуванням кутів схилів, явно недостатньо для прогнозування зсуво-небезпечності. Карта, побудована на основі ураху-

вання цих факторів, коли зсувонебезпечними вважалися ділянки з кутами схилів, більшими ніж 15° для обезлісених схилів і понад 30° для вкритих лісом, показала велику розбіжність з реальним розташуванням зсувів. Разом з тим застосування засобів ГІС дозволило визначити розподілі лісового покриву, вирубок та поновлення лісів за висотами, в межах річкових басейнів тощо. Це має велике значення для робіт з лісовпорядкування та визначення несанкціонованих вирубок.

До факторів впливу на розвиток зсувних процесів можна віднести:

- наявність або відсутність лісового покриву;
- висота ділянки;
- крутизна схилу;
- типи ґрунтів;
- розподіл опадів на певні періоди часу;
- віддаленість від населених пунктів;
- віддаленість від доріг та ліній комунікацій;
- віддаленість від водних об'єктів.

На розвиток зсувного процесу впливає також вологість ґрунту, значення якої дуже змінюється як в просторі, так і в часі. Тут у нагоді можуть бути дані аерокосмічних спостережень, але для врахування як фактора впливу необхідні інтегральні показники на основі ряду постійних спостережень, яких зараз немає. Разом з тим вплив змін вологості частково може бути врахований в інших факторах при експертних оцінках.

Стадії багатокритеріального аналізу з використанням можливостей ГІС представлени на рис. 2. Був застосований метод експертних оцінок (метод парних порівнянь Saatі) [3] для визначення вагових коефіцієнтів (ординальних оцінок) факторів впливу на зсувні процеси. Шляхом порівняння альтернатив, в загальному випадку з усіма іншими з даного набору, були визначені елементи матриці порівнянь. Елемент матриці — це відповідне число, яке визначає результат порівняння альтернатив відносно критерію.

Відносні ваги розрахованісь як результат обробки матриці порівнянь. Для розрахунку віднос-

Відносні ваги факторів впливу на зсувні процеси Закарпаття

Альтернатива	Фактор впливу	Оцінки експертів	Ваги
A1	Висота	4	0.0870
A2	Крутізна схилу	8	0.1739
A3	Відстань від н/п	6	0.1304
A4	Відстань від доріг	4	0.0870
A5	Відстань від водного об'єкта	6	0.1304
A6	Тип ґрунту	5	0.1087
A7	Кількість опадів	5	0.1087
A8	Ліс	8	0.1739

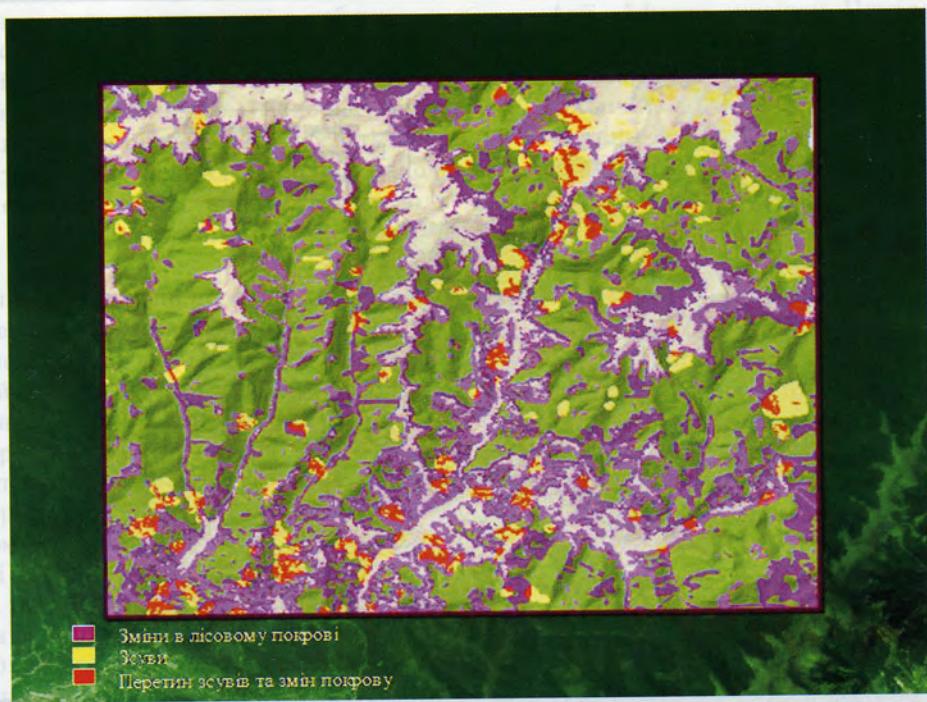


Рис. 1. Зміни лісового покриву за 1944–2000 рр. і розповсюдження зсувів

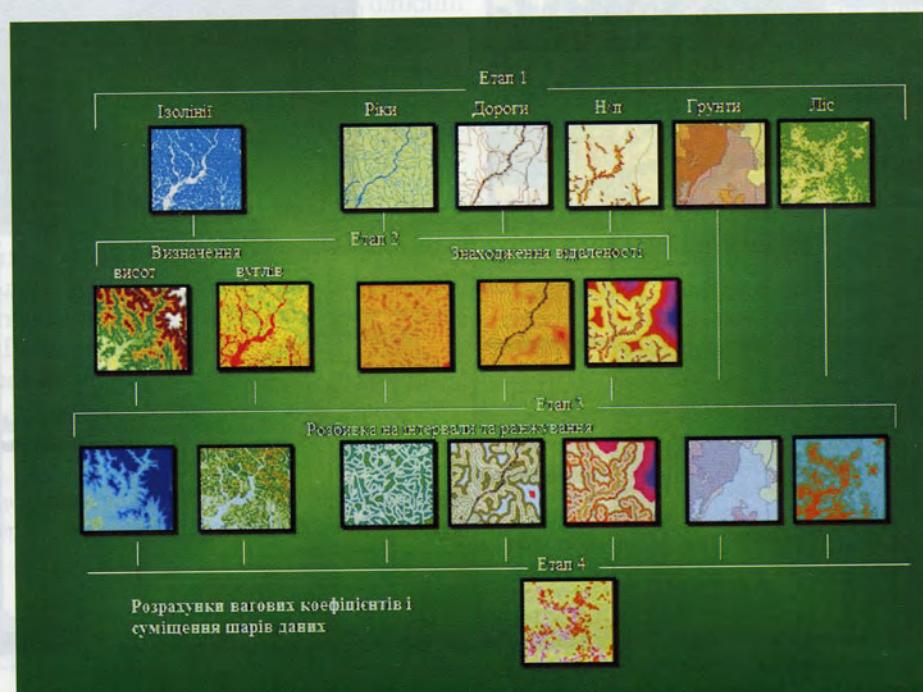


Рис. 2. Етапи багатокритеріального дослідження

При зокрема
на відсутніх
у ефективному
захисті. Також
важливістю

Наші дани
1997 р. та
попередній по-
сваритська
Відповідно до
гри з проек-
тиль вису-
до членів
навчально-
літературна
засобами
її. У 2001 р.
законом про
ПКД в
відповідності
з роботою
Земельного
Фонду була
змінена

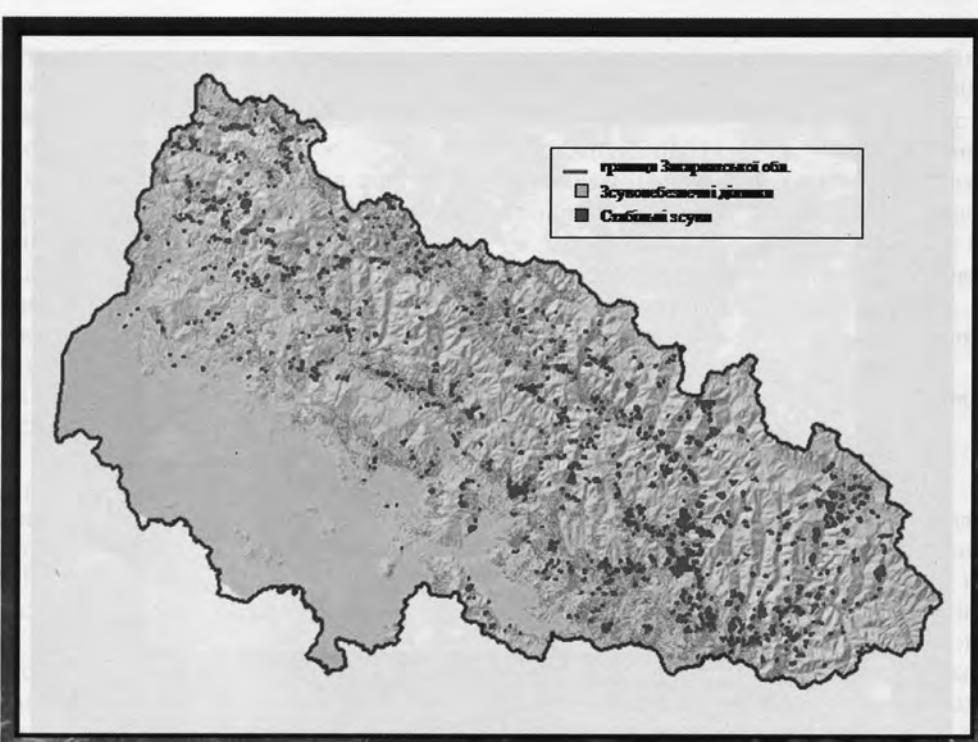


Рис. 3. Аналіз зіставлення прогнозованих зсувонебезпечних ділянок з реальним розташуванням зсувів

змінено земельного фонду, який відноситься до земель, що не піддаються земельному обліку.

У цей час роботи
згуртування
прогнозованої
зональності
зсувів виконані
з урахуванням
загальніх
запобіжних
засобів.

В результаті
згуртування
результатів
використання
програмного
засобу Dynamic
Atlas (1994-1995)
було отримано
зональну «Лан-



Рис. 4. Об'єднання вихідних даних та результатів робіт з використанням програмного забезпечення Dynamic Atlas

них коефіцієнтів був використаний метод суми стовпчиків. Результати представлені в таблиці.

На рис. 3 показано карту зсувионебезпечності в Закарпатті. Слід відмітити досить добру кореляцію прогнозних ділянок з розподілом наявних зсуviв. Особливо важливим для продовження досліджень, а також для застосування певних захисних заходів на місцевості, є виявлення зсувионебезпечних ділянок, на яких зсуви в даний момент не відбуваються.

Для подальших досліджень необхідно включити в число факторів впливу динаміку змін лісового покриву на основі наведеного підходу, який був відправлений на частині Закарпаття, і побудувати відповідні інформаційні шари для вього регіону.

Особливого розгляду потребує вивчення можливого впливу глобальних змін клімату на розвиток небезпечних природних явищ в Закарпатті. окремі нарочки в цьому напрямку існують, але необхідні більш системні дослідження.

Вихідні дані та результати робіт були об'єднані з використанням програмного забезпечення Dynamic Atlas (рис. 4), що надає можливість широкого використання та розповсюдження їх на CD та через інтернет.

Тут слід відмітити, що сучасні досягнення в області програмного забезпечення дозволяють перехід на новий рівень представлення інформації (звіти, атласи, тощо), для якої суттєве значення має просторова розподіленість даних, в цифровому вигляді. До узагальнених вимог щодо публікації інформації можна віднести:

- максимальне відображення основних положень атласу, електронного звіту тощо у вигляді карт, таблиць, діаграм, фото, а також тексту, присвячених до географічних об'єктів (річка, населений пункт тощо);
- можливість пошуку та відображення на карті шарів даних, географічних об'єктів, пов'язаних з ними таблиць даних та додаткової інформації;
- забезпечення широкого розповсюдження інформації на CD та через інтернет.
- Аналіз переваг та недоліків різних підходів до публікації та розповсюдження просторово-розподілених даних (використання відомих комерційних ГІС та картографічних серверів інтернет тощо) показав перспективність використання програмного забезпечення (ПЗ) Dynamic Atlas.

ПЗ Dynamic Atlas:

- Створене SKE Inc. на замовлення Організації з продовольства та сільського господарства (FAO) при ООН.
- Разом із створеними різnobічними тематичними

сховищами даних ПЗ широко впроваджується в Азії, Африці, країнах Центральної та Східної Європи

- Міжнародні організації ООН з використанням космічного простору глобальна система спостережень Землі (GTOS) та ін. рекомендують ПЗ для використання, в тому числі шляхом організації навчання та постачання.

ПЗ широко використовується в ІКД НАНУ-НКАУ та організаціях-партнерах по спільних роботах. На його основі створено атлас Закарпаття, підготовлені електронні версії Національної доповіді України (спеціальне видання) до П'ятої Паневропейської конференції та Зведені доповіді ПРООН-ГЕФ про екологічний стан басейну Дніпра. окремі компоненти ПЗ використовуються при створенні Української мережі аерокосмічних спостережень Землі (УМАКС).

Автори висловлюють щиру подяку окремим особам (Є. О. Яковлев, Ю. М. Штепа, І. В. Макаренко) та організаціям (Український центр менеджменту землі і ресурсів, Укрліспроект, ін.) за сприяння роботі та надання вихідних даних.

1. Гидрогеологическое прогнозирование: Пер. с англ. / Под ред. М. Г. Андерса, Т. П. Берта. — М.: Мир, 1988.—736 с.
2. Колодязьний О. А., Макаренко І. В., Штепа Ю. М., Яковлев Є. О. Дослідження змін лісового покриву та можливого впливу на небезпечні природні явища в Закарпатті // Тези Першої української конф. з перспективних космічних досліджень. — Київ, 2001.—С. 103—104.
3. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект. — Київ: Наук. думка, 2002.—248 с.
4. Lillesand T. M., Kiefer R. W. Remote sensing and image interpretation. — New York: John Wiley & Sons, 1994.—750 р.
5. Sabins F. F. Remote sensing: principles and interpretation. - New York: W. H. Freeman and Company, 1997.—494 р.

GEOSPATIAL ANALYSIS OF MAPS AND REMOTE SENSING INFORMATION FOR CHANGE DETECTIONS AND PREDICTIONS OF LANDSLIDE SAFETY

V. Makarenko, O. Kolodiaznyi

Some advantages of joint use of remote sensing (RS) technologies, geographical information systems (GIS) and simulation tools for investigation of complicated processes in the environment, natural hazard management etc. are presented. The whole cycle from RS data processing, geospatial and multicriteria analysis up to thematic spatial information publication are implemented for Carpathian region as an example. Space images and archive topographical maps are used for detection of changes in land use and for analysis of their possible impact on landslide processes development. A map of landslide emergencies of Carpathian region are prepared on the basis of landslides state and impact factors assessments as well as lines of further work are identified.

УДК 528.7:528.8

Е. И. Бушуев¹, В. И. Волошин¹, Е. И. Махонин², С. П. Мосов³

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

³Національна академія оборони України, Київ

Системные обработки схемы данных технологий ДЗЗ

Розглянуто сучасні технологічні схеми і рівні обробки даних дистанційного зондування Землі. Обґрутовано необхідність проведення тематичної обробки в спеціалізованих регіональних і відомчих центрах. Розглянуто принципи створення і функціонування таких центрів.

В технологической цепочке планирования, сбора, передачи и усвоения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обработка занимает исключительно важное место, поскольку именно на этом этапе происходит превращение исходного потока данных от КА в готовый информационный продукт.

Для современных условий важность и трудоемкость этого этапа характеризуется и тем, что в стоимости готового продукта затраты на обработку могут достигать 80 %, а затраты на получение данных ДЗЗ — 20 %.

Для современных космических систем наблюдения Земли с передачей информации по радиоканалам технологический цикл обработки можно представить в виде отдельных этапов с характерными группами операций для каждого этапа, и обеспечивающих достижение определенного уровня (см. рис. 1).

Относительная стоимость продукта в зависимости от уровня обработки приведена на рис. 2.

В зависимости от оснащенности, подготовки и интересов пользователей им нужна информация различных уровней. Так, автономные пункты приема информации (АППИ) пользователей получают информацию уровня R , большие и хорошо оснащенные ведомственные и региональные геоинформационные центры будут предпочитать информацию уровней 0 или 1. В настоящее время достаточ-

но широк и продолжает активно развиваться слой пользователей, имеющих ГИС-средства. Для них предпочтительными являются данные ДЗЗ на уровнях обработки 2 или 3. И наконец, наиболее представительным для условий Украины является слой пользователей, заинтересованных в получении продуктов тематической обработки уровней 3 или 4.

Для современных космических систем EOS, «Landsat», «Spot», «Ikonos» и др. (<http://eospso.gsfc.nasa.gov>; <http://landsat.gsfc.nasa.gov>; <http://www.spotimage.fr>; <http://www.spacetimaging.com>) общепризнанно, что наземный специальный комплекс космической системы проводит только предварительную валовую обработку поступающей информации с целью ее приведения к некоторому стандартизованному уровню 0, 1 или в некоторых случаях 2.

Более глубокая обработка уровней 2, 3, 4 проводится в специализированных тематических центрах с привлечением дополнительной информации из других источников.

Для наилучшего удовлетворения потребностей пользователей и с целью повышения отдачи от КС ДЗЗ в состав космической системы целесообразно ввести пользовательский сегмент системы (рис. 3) в качестве функционально-привлекаемого элемента КС. Об актуальности решения такой задачи говорит тот факт, что в настоящее время Европейская



ROW	Регистрация «сырого» потока, принимаемого с КА			Аннотация +		
Предварительная обработка	Уровень 0	Распаковка по приборам и каналам Преобразование в растровую структуру				
	1.	Уровень 1	Привязка по орбитальным данным Разделение на кадры. Оценка качества			
Нормализация	1A	+ Радиометрическая коррекция + % сбойных пикселей				
	1B	+ Геометрическая коррекция				
	1C	+ Привязка по картам местности + % облачности				
	1D	+ Привязка по опорным точкам				
Межотраслевая обработка - картооснова	2.	Уровень 2	Пересчет в заданную картографическую проекцию			
	2A	+ Полная радиометрическая коррекция				
	2B	+ Полная геометрическая коррекция				
	2C	+ Орторектификация				
Межотраслевая обработка - тематика по заказу пользователя			Уровень 3	Формирование тематических слоев		
			Уровень 4	Выходные модели, карты, ГИС-проекты		

Рис. 1. Уровни обработки

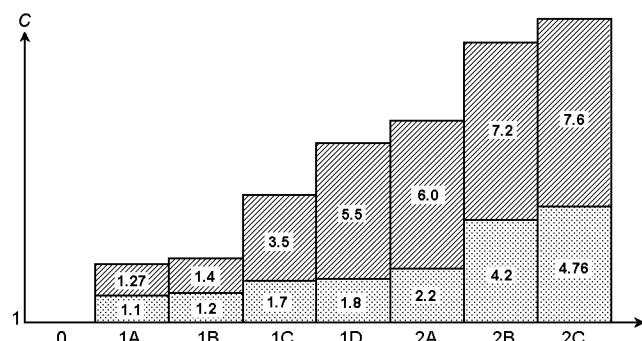


Рис. 2. Зависимость относительной стоимости информационного продукта ДЗЗ от уровня обработки

комиссия и Европейское космическое агентство планируют к 2008 г. масштабное строительство подобной структуры Global Monitoring Environment and Security — GMES как постоянно действующей эксплуатационной службы (<http://earth.esa.int/gmes>).

Задачами пользовательского сегмента являются:

1. Своевременное и регулярное снабжение субъектов хозяйствования и государственного управления аэрокосмической информацией (АКИ), в том числе:

- данными наблюдения Земли от авиакосмических средств;
- данными геопозиционирования от спутниковых навигационных систем;

— результатами обработки АКИ с использованием наземной заверочной информации (ортокосмокарты, тематические карты и др.).

2. Формирование рынка пользователей АКИ путем:

- предоставления услуг пользователям по участию в отработке технологий решения целевых задач пользователей,
- тематической обработке АКИ по согласованной технологии,
- подготовки и обучения пользователей,
- оснащения пользователей специализированными аппаратно-программными средствами для приема и обработки АКИ;
- реализации совместных прикладных программ и экспериментов на договорной основе.

3. Выработка требований к перспективным КС ДЗЗ, исходя из нужд пользователей.

Структурно пользовательский сегмент (ПС) представляет сеть специализированных региональных и предметно-ориентированных центров обработки данных ДЗЗ. Первую очередь таких центров предлагается создать на базе организаций, активно занимающихся обработкой данных и участвующих в выполнении Национальной космической программы Украины (таблица).

В Национальной космической программе Украины на 2003—2007 гг. предусматривается создание отдельных элементов пользовательского сегмента в



Рис. 3. Структура космической системы наблюдения Земли

рамках проектов «Антикриз», «Космокарта», УМАКС, «Мониторинг». В целом организация в НКАУ космической деятельности по ДЗЗ, охватывающая все три сегмента КС ДЗЗ, представлена на рис. 4.

Однако, учитывая характер решаемых ПС задач, следует признать, что полномасштабное строительство ПС по существу является задачей государственного и межведомственного уровня, поскольку направлено на качественное улучшение геоинформационного обеспечения в самых различных областях управляемской и хозяйственной деятельности.

В этом плане целесообразно рассмотреть основные принципы создания и функционирования пользовательского сегмента.

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО СЕГМЕНТА (ПС)

1. Правовой основой для создания и функционирования пользовательского сегмента является Указ Президента Украины «Про заходи щодо використання космічних технологій для інноваційного розвитку економіки держави» от 06.02.2001, № 73, Закон Украины «Про національну програму інформатизації» и заданий «Национальной программы інформатизации». Исходя из заданий этой программы на 2000—2002 гг. (Постанова Верховной Рады від 06.07.2000 г. № 1851-III), следует определить ПС как основной держатель национальных геоинформационных ресурсов в части данных ДЗЗ и как специализированную систему геоинформационного космического обеспечения (СГИКО), взаимодействую-

ющую с ведомственными и региональными информационно-аналитическими системами.

2. СГИКО представляет сеть региональных и ведомственных центров тематической обработки данных ДЗЗ, которые создаются и эксплуатируются при поддержке Национального космического агентства Украины и заинтересованных пользователей.

3. Система СГИКО дополняет существующие и создаваемые информационно-аналитические системы (ИАС) пользователей национального, регионального и ведомственного уровня аэрокосмическими данными.

При этом с помощью аэрокосмических данных должны обеспечиваться:

- валидация данных от разнородных ведомственных источников, проверка их достоверности;
- генерализация и актуализация данных по всей площади области интереса пользователя;
- геопозиционирование субъектов и объектов хозяйственной деятельности, природных процессов и явлений в единой системе координат;
- регулярный мониторинг области интереса пользователей по согласованному регламенту наблюдений.

4. Наземную заверочную информацию для СГИКО должны поставлять прикладные информационно-аналитические системы (ИАС) пользователей и информационные фонды по согласованной структуре и регламенту обмена информацией.

5. Система СГИКО должна разрабатываться в архитектуре распределенных ГИС систем с использованием современных сетевых и телекоммуникационных технологий.

6. Система СГИКО создается поэтапно, путем наращивания информационных возможностей и расширения состава абонентов системы.

7. СГИКО должна быть системой, открытой для сотрудничества на коммерческой основе.

8. СГИКО является элементом национальной распределенной системы информационных ресурсов, состоящей из базовой сети региональных и специализированных центров ГИКО, обеспечивающих усвоение и интеграцию АКИ в ИАС государственного управления и в ведомственных ИАС.

9. Для гарантированного обеспечения информации центры СГИКО должны иметь собственные источники данных в составе автолаборатории и беспилотного легкого летательного аппарата ДЗЗ (БПЛА-ДЗЗ).

10. Источником информации для СГИКО являются:

- данные, получаемые от космической системы «Січ»;
- данные ДЗЗ, получаемые через международные

Состав и функции центров сети геоинформационного космического обеспечения

Принцип: Сеть развивается и функционирует на долевой основе НКАУ, НАНУ и заинтересованных пользователей

№ п/п	Центры	Функции, выполняемые организацией		
	базовые организации	в рамках КС	регионального уровня (обслуживаемые территории)	Базовые тематические и методические задачи
1	Институт космических исследований НАН и НКА Украина, Киев	Интеграция потребностей общества в услугах ДЗЗ и формирование требований к КС	Украина	Информационная инфраструктура ПС
2	Центр аэрокосмических исследований Земли НАН Украины (ЦАКИЗ), Киев	Научно-методический центр ДЗЗ. Программа научно-прикладных исследований	Украина	Оптические наблюдения. Геоэкология. Водные ресурсы. Лесное хозяйство
3	Центр архивации и распространения данных ГНПЦ «Природа»	Поддержка и обслуживание распределенной базы данных ДЗЗ. Государственный архив данных ДЗЗ	Украина, Киев Обслуживание ведомств	Стандарты, форматы и процедуры обмена данными
4	Украинский центр менеджмента земельных ресурсов (УЦМЗР)	Станция приема 1. 7 ГГц	Украина	Чрезвычайные ситуации, Земельные ресурсы
5	НЦУИКС, г. Макаров		Украина	Контроль космического пространства
6	ЛЦ ИКИ, г. Львов	Бортовая аппаратура для исследования космического пространства	Украина	Космическая погода
7	Приднепровский, Днепропетровск ГП «Днепрокосмос»	Разработка ПО для планирования работы и управления КС, обработки данных ДЗЗ. Обучение пользователей	Днепропетровская, Запорожская, Кировоградская, Донецкая обл.	Агроземельные ресурсы. Геоинформационное обеспечение органов гос. управления регионального уровня
8	Причерноморский, Евпатория НЦУИКС	Эксплуатация КС Интеграция данных от региональных центров	Крым, Херсонская, Одесская, Николаевская обл.	Оперативный информационно-аналитический центр ИАС НКАУ
9	Подольский, Дунаевцы НЦУИКС	Главный центр приема и обработки КИ. Оператор системы навигационного обеспечения СНО.	Хмельницкая, Тернопольская, Винницкая обл.	
10	Восточный, Харьков ЦРЗЗ, НАН	Региональный центр приема 137 МГц	Харьковская, Полтавская, Сумская, Луганская обл.	Радиолокационное наблюдение
11	Морской, Севастополь МГИ, НАН	Региональный центр приема 1.7 ГГц и обработки КИ	Мировой океан, Черное и Азовское моря	Океанография. Морское и рыбное хозяйство. Экология моря
12	Западный, Львов АКИЭМ НАНУ		Волынская, Львовская, Закарпатская, Ивано-франковская, Черновицкая обл.	Лесное хозяйство. Экология

сети распространения данных ДЗЗ, архивные данные ДЗЗ;

- данные от собственных наземных и авиационных средств ДЗЗ;
- данные наземных обследований и режимных наблюдений, поступающие по согласованному регламенту от прикладных ИАС отдельных пользователей;
- данные от навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и Navstar.

Основной задачей ГИКО является переработка исходной информации в товарный продукт и доведение этого продукта до пользователей по согласо-

ванному регламенту в рамках прикладных информационно-аналитических систем пользователей.

11. Состав аппаратно-программных средств региональной подсистемы СГИКО-Р:

- аппаратно-программный комплекс обработки данных ДЗЗ, например, на базе разработанного ГП «Днепрокосмос» и переданного в опытную эксплуатацию в 2003 г. ПТК обработки изображений;
- телекоммуникационный сервер обмена данными ДЗЗ, доступа в интернет и коммуникационную сеть ИАС со средствами защиты информации;

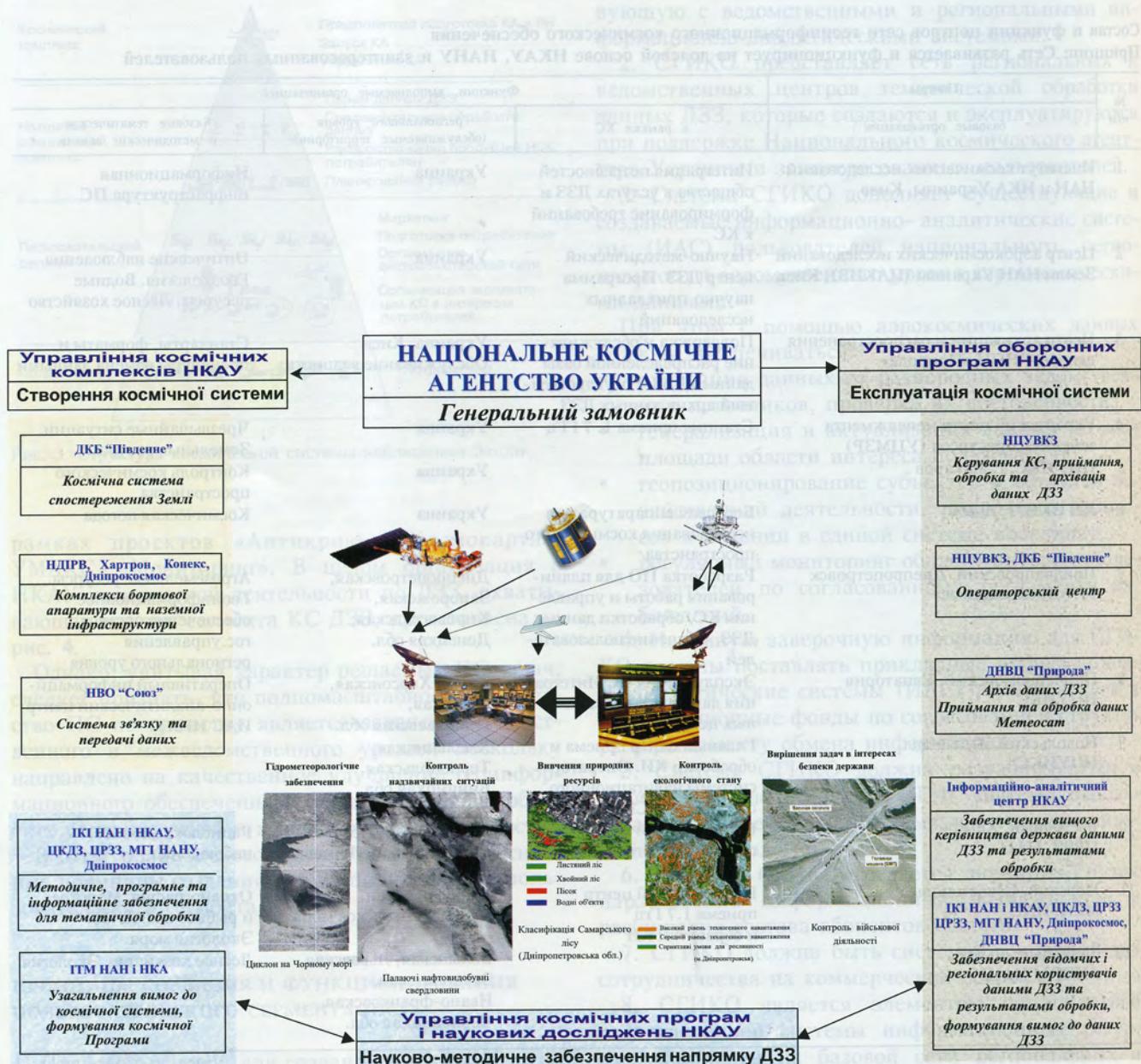


Рис. 4. Схема космической деятельности

- СУБД для управления и администрирования распределенной базы геопространственных данных ИАС;
- региональный пункт контроля навигационного поля с 2-3 полевыми комплектами GPS-приемников;
- автолаборатория контроля окружающей среды, оснащенная вычислительными средствами, GPS-приемником, БПЛА-ДЗЗ, радиоканалом обмена данными с региональным центром СГИКО-Р и сменным набором приборов для экспресс-обследований состояния окружающей среды.

Усвоение данных ДЗЗ с помощью СГИКО на регулярной основе выдвигает и более высокие требования к качеству данных ДЗЗ в части преемственности данных, их регулярной радиометрической и геометрической калибровки в процессе полета,

интеркалибровки различных съемочных систем, обеспечению атмосферной коррекции.

Решение этих задач и формирование пользовательского сегмента КС является важнейшей задачей оператора космической системы и заинтересованных пользователей.

SYSTEM PROCESS FLOWSHEETS OF REMOTE SENSING DATA PROCESSING

E. I. Bushuev, V. I. Voloshin, E. I. Mahonin, S. P. Mosov

Some modern process flowsheets and levels of the processing of Earth remote sensing data are considered. The necessity of carrying out subject processing in specialized regional and departmental centres is justified. Some principles of creation and functioning of such centres are discussed.

УДК 528.8(15):629.78

А. И. Федякин¹, В. П. Зубко², С. В. Заяц², В. М. Мамчук¹

¹Інститут технічної механіки НАНУ—НКАУ, Дніпропетровськ,

²Національне космічне агентство України, Київ

**Методологические
аспекти
оценки
эффективности
космических
систем
дистанционного
зондирования
Земли**

Запропоновано методологію оцінки ефективності космічних систем дистанційного зондування Землі, що базується на аналізі економічних, наукових і технічних аспектів, а також враховує стохастичність вихідної інформації.

Оценка эффективности — свойства объекта выдавать полезный результат при использовании его по назначению — важный и неотъемлемый этап при разработке, создании и эксплуатации сложных технических систем, который необходим для обоснования целесообразности разработки, определения оптимальных параметров и др.

Космические системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) предназначены для получения данных о нашей планете с определенными временными, пространственными и спектральными характеристиками. В свою очередь, данные используются в качестве исходной информации для получения различных результатов (эффектов), прежде всего экономического (путем решения многочисленных хозяйственных задач) [1], социального (экологического мониторинга, прогнозирования погоды, предупреждения стихийных бедствий, повышение занятости населения), научного (открытия, изобретения, публикации), технического (улучшение параметров и характеристик, количества и качества информации) и др. Эффекты могут быть получены при разработке, изготовлении и эксплуатации КС ДЗЗ, а возникают от создания добавленной стоимости, рабочих мест, предоставления услуг, продаже (передачи) технологий и т. п. Их можно разделить на прямые, которые связаны с достижением целей проектов, и косвенные, касающиеся видов деятельности, не связанных с достиже-

нием целей проектов. Кроме этого, эффекты подразделяются на внутри- и внеотраслевые, причем последние могут быть значительно больше первых. Количественные оценки этих эффектов являются соответствующими критериями эффективности. Кроме этого, могут рассматриваться различные уровни, например научно-технический, технико-экономический, которые характеризуют совершенство объекта, могут измеряться в баллах и служат для сравнительного анализа.

Экономические критерии должны характеризоваться прибылью, которая получается за счет уменьшения затрат и увеличения доходов от выполнения задач, предотвращения возможных убытков и ущерба за счет использования космических средств.

Критерии научной эффективности должны характеризовать возможность получения и достоверность новых знаний, а также их использования для создания принципиально новых видов техники и технологий, предоставления услуг.

Совокупность критериев социальной эффективности должна включать характеристики улучшения здоровья и качества жизни населения, повышения его занятости, общобразовательного уровня и квалификации.

Критерии технической эффективности должны характеризовать входные, выходные параметры системы (количество и качество информации, массогабаритные и энергетические показатели и т. п.).

В класс специальных критериев эффективности целесообразно включить те, которые не характеризуют цели, для достижения которых создана КС ДЗЗ, а предназначены для характеристики достоверности достижения поставленных целей, выполнения задач, а также влияния результатов на научно-техническое развитие космической деятельности.

Необходимо отметить, что разграничение тех или иных явлений, характеризующих в чистом виде техническую, экономическую или социальную эффективность на практике осложнено их тесным переплетением. В зависимости от этапов создания КС ДЗЗ, методик оценки и имеющихся исходных данных (ИД), требованиям к критериям, эффективность можно подразделять на потенциальную, ожидаемую и фактическую [4].

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Одним из основных критериев экономической эффективности является чистый дисконтированный доход (ЧДД), определяемый как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному году, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (P_t - Z_t) \frac{1}{(1-a)^t}, \quad (1)$$

где P_t , Z_t — результаты и затраты на шаге расчета t , T — горизонт расчета, a — норма дисконтирования.

С ЧДД тесно связан индекс доходности, внутренняя норма доходности и срок окупаемости.

Для создания набора представительных критериев из непредставительных, чтобы охарактеризовать объект, необходимо рассмотреть дополнительное множество критериев, в которое могут входить:

- чистый доход от использования информации с КС ДЗЗ и предупреждения возможных убытков при ее отсутствии;

- потенциальные убытки в будущем, если проект не будет выполнен.

Основной трудностью при оценке потенциальной и ожидаемой экономической эффективности является определение интегральных результатов и затрат. Для примера, сделаем оценку потенциальной экономической эффективности от использования данных ДЗЗ в сельском хозяйстве при выращивании зерновых культур, что очень актуально для Украины.

Исследования [3] и опыт развитых стран показывает, что экономический эффект от сокращения потерь зерна за счет оптимизации его производства

Таблица 1. Показатели валовых сборов зерновых

Год	Валовой сбор зерна, млн тонн
1995	33.93
1996	24.571
1997	35.472
1998	26.471
1999	24.581
2000	24.459
2001	39.671

с использованием аэрокосмической информации составляет 2 % от стоимости урожая. Показатели валового сбора зерновых в Украине по данным Госкомстата приведены в табл. 1.

Средний валовой сбор зерна Q составил

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^7 Q_i}{7} = \frac{209.155}{7} \approx 30 \text{ млн т.}$$

Стоимости одной тонны зерновых по данным НИИЭ МЭ составляла в 2000 г. — 443.8 грн/т, в 2001 г. — 382.8 грн/т, отсюда средняя стоимость тонны зерновых в последние годы примерно равна

$$\bar{P}_{cp} = \frac{443.8 \cdot 24.459 + 382.8 \cdot 39.671}{24.459 + 39.671} \approx 406 \text{ грн/т.}$$

Усредненная стоимость \bar{P} валового сбора Q зерновых составляет

$$\bar{P} = \bar{P}_{cp} \cdot Q = 406 \cdot 30 \cdot 10^6 \approx 12.2 \cdot 10^9 \text{ грн.}$$

Величину годового экономического эффекта \mathcal{E}_{ϕ} от использования данных ДЗЗ в рассматриваемом случае определим по выражению

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\phi} &= 0.02 \cdot \bar{P} = 0.02 \cdot 12.2 \cdot 10^9 = \\ &= 244 \text{ млн грн} \approx 45.5 \text{ млн дол. США.} \end{aligned}$$

Прогнозная оценка (ГКБ «Южное») стоимости разработки, создания и эксплуатации национальной КС ДЗЗ «Січ-1М» составляет 75.5 млн дол. США. Таким образом, сопоставление величины экономического эффекта с затратами показывает, что срок окупаемости системы только за счет использования ее данных в сельском хозяйстве не превосходит двух лет с момента начала эксплуатации.

Определим ожидаемый экономический эффект от использования данных ДЗЗ в сельском хозяйстве Украины по значениям экономического эффекта от применения КС ДЗЗ в США, величины которого приведены в табл. 2 [2].

Положим, что потенциальный экономический эффект от использования данных ДЗЗ в отечест-

Таблица 2. Прогнозная экономическая эффективность использования данных ДЗЗ спутника «Лэндсат»

Область применения	Экономическая эффективность, млн дол. США
Сельское хозяйство (растениеводство)	294—581
Землепользование	42—79
Лесное хозяйство	7
Водные ресурсы	13—41
Геологоразведка нефти и других полезных ископаемых	64—200

венном сельском хозяйстве пропорционален отношению уборочных площадей под основными культурами Украины (33.2 млн га) и США (200 млн га).

Значения нижней $\mathbb{E}_{\text{оф}}^{\text{h}}$ и верхней $\mathbb{E}_{\text{оф}}^{\text{v}}$ оценок эффекта с учетом данных табл. 1 и 2 в этом случае будут равны

$$\mathbb{E}_{\text{оф}}^{\text{h}} = \frac{33.2}{200} 294 = 48.8 \text{ млн дол. США},$$

$$\mathbb{E}_{\text{оф}}^{\text{v}} = \frac{33.2}{200} 581 = 96.4 \text{ млн дол. США}.$$

Таким образом, нижняя оценка потенциального годового эффекта, полученная на основании рассмотренных исходных данных, хорошо согласуется с оценкой, полученной согласно первому подходу.

ОЦЕНКА НАУЧНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Целью научных исследований, включая космические, является открытие новых объектов и процессов, получение информации об их свойствах, а также уточнение представлений о ранее открытых и наблюдавшихся явлениях. Одним из критериев эффективности разрабатываемых КС ДЗЗ на этапе проектирования может служить предполагаемая степень результативности планируемых исследований, которая зависит в основном от двух факторов: полноты решения научной задачи и надежности космического комплекса [1].

Полнота решения задачи ДЗЗ количественно может быть выражена как вероятность P_s обнаружения и опознавания объектов или процессов. Надежность КС ДЗЗ (надежность получения данных об исследуемой области) характеризуется вероятностью P_v его безотказной работы. Таким образом, научная эффективность R использования космической системы ДЗЗ (результативность исследований) может быть охарактеризована выражением [1]

$$R = P_s P_v.$$

При наличии априорной информации о средних значениях параметров исследуемых объектов, об элементах корреляционной матрицы этих параметров и о вероятности наличия распознаваемых объектов в момент проведения бортовой аппаратурой необходимых измерений вероятность P_s обнаружения и опознавания объектов может быть представлена в виде [1]

$$P_s = P_D(r)P_{\Delta_B}(b)P_{T_{\Pi}}(t)P(M)P(\delta), \quad (2)$$

где $P_D(r)$ — вероятность обнаружения космической системой объекта исследования, $P_{\Delta_B}(b)$ — вероятность выделения объекта на фоне других объектов, $P_{T_{\Pi}}(t)$ — вероятность наблюдения объекта, $P(M)$ — вероятность правильной интерпретации объекта, $P(\delta)$ — вероятность отсутствия облачности в районе наблюдений.

Методика определения P_s по формуле (2) дана в работе [1].

ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

К критериям социальной эффективности относятся:

- увеличение числа рабочих мест N_{PM} , которое может быть обосновано на прогнозировании значения добавленной стоимости:

$$N_{PM} = \frac{\Delta_H}{\Delta},$$

где Δ_H — добавленная стоимость, которая будет получена в результате выполнения проекта, Δ — добавленная стоимость выполненного проекта;

- количество людей, повысивших уровень квалификации (определяется путем прогнозирования временных рядов на основании статистических данных по выполненным проектам для групп: молодые специалисты, поступившие в аспирантуру, защитившие диссертации, другие);

- содействие развитию малого и среднего бизнеса, что определяется количеством предприятий малого и среднего бизнеса задействованных в реализации проектов ДЗЗ, а также числом экономически привлекательных сфер деятельности для создания предприятий малого и среднего бизнеса;

- помочь в деятельности общественных и молодежных организаций (количество лекций, популярных телепередач, статей и т. п.);

- услуги, способствующие улучшению здоровья и увеличению продолжительности жизни населения Украины (прогноз погоды, экологический мониторинг, городское планирование);

- повышение уровня образования (число конференций, выпускников высших учебных заведений,

специалистов, защитивших ученые степени;
— увеличение занятости в космической отрасли и смежных отраслях.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Вероятность достижения поставленных целей равна

$$P_{\text{ц}} = \int_{V_{1t}}^{V_{2t}} \int_{R_1}^{R_2} P(V, t, R) f(V) f(t) f(R) dV dt dR,$$

где $P(V, t, R)$ — функция вероятности достижения целей, зависящая от объема финансирования V , времени его получения t и необходимых материальных ресурсов R , которые при определенных условиях можно принять за случайные величины; $f(V), f(t), f(R)$ — плотности распределения V, t, R .

Влияние разработок, относящихся к ДЗЗ, на научно-техническое развитие предприятий и космической отрасли характеризуется количеством новых технологий, реализованных проектов и программ.

Достоверность $P_{\text{пр}}$ выполнения $N_{\text{пр}}$ новых проектов:

$$P_{\text{пр}} = \prod_{i=1}^{N_{\text{пр}}} P_i,$$

где

$$P_i = \int_{V_{1i}}^{V_{2i}} \int_{R_1}^{R_2} P(V, t, R) \prod_{j=1}^3 f_j(x_j) \cdot P \left[\begin{array}{l} \nu_{ip} \geq \leq \nu_i \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right].$$

При условии учета стохастичности исходной информации полной характеристикой показателя эффективности является закон распределения.

Рассмотрим на простом примере задачу, в которой требуется определить закон распределения F_E эффективности за заданный период τ_s .

Будем считать, что рассматриваемая система состоит из двух различных не резервированных приборов с производительностями γ_1 и γ_2 (пусть $\gamma_1 > \gamma_2$). Время работы каждого прибора определяется временем его безотказной работы и подчинено экспоненциальному закону распределения с интенсивностью отказов λ . Под эффективностью системы будем понимать суммарный объем информации (данных), произведенный двумя приборами.

Понятно, что отказ любого прибора в течение τ_s может привести к некоторому снижению эффективности системы в целом. Поэтому суммарный результат системы будет определяться временем τ_1 работы 1-го прибора и временем τ_2 работы 2-го прибора. При безотказной работе приборов объем выходной информации будет определяться заданным временем τ_s . Учитывая это, можно записать

$$E = Q_1(\tau_1) + Q_2(\tau_2), \quad (3)$$

где

$$Q_j(\tau_j) = \begin{cases} q_j \tau_j, & \text{если } \tau_j < \tau_s, \\ q_j \tau_s, & \text{если } \tau_j \geq \tau_s, \end{cases} \quad j = 1, 2. \quad (4)$$

Здесь $q_j = c_j \gamma_j$, c_j — средняя за время τ_s стоимость единицы информации (снимка) прибора j (пусть $c_j = 1$); τ_j — время безотказной работы прибора j с плотностью вероятности

$$f_j(\tau_j) = \lambda \exp(-\lambda \tau_j), \quad j = 1, 2. \quad (5)$$

Принимая во внимание (3)–(5), определим закон распределения эффективности E как закон распределения функции случайных величин τ_1 и τ_2 .

С использованием теории функции случайных величин получены следующие выражения закона распределения эффективности:

$$\begin{aligned} P(E < E^*) \Big|_{D_Q^3} &= P \left(\tau_1 + \frac{\tau_2 \gamma_2}{\gamma_1} < \frac{E^*}{\gamma_1} \right) \Big|_{D_\tau^3} + \\ &+ P \left(\tau_1 + \frac{\tau_2 \gamma_2}{\gamma_1} \geq \frac{E^*}{\gamma_1} \right) \Big|_{D_\tau^{3''}} + P \left(\tau_1 + \frac{\tau_2 \gamma_2}{\gamma_1} \geq \frac{E^*}{\gamma_1} \right) \Big|_{D_\tau^{3'''}} = \\ &= \lambda^2 \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_1}} \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tau_1} \exp[-\lambda(\tau_1 + \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 + \\ &+ \lambda^2 \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \tau_2} \int_0^{\infty} \exp[-\lambda(\tau_1 + \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 + \\ &+ \lambda^2 \int_{\frac{E^*}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tau_1}^{\infty} \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tau_3} \exp[-\lambda(\tau_1 + \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 = \\ &= 1 - \frac{1}{\gamma_2 - \gamma_1} \left\{ \gamma_2 \exp \left[-\frac{\lambda}{\gamma_1} [E^* - (\gamma_2 - \gamma_1) \tau_s] \right] - \right. \\ &\quad \left. - \gamma_1 \exp \left[-\frac{\lambda}{\gamma_2} [E^* - (\gamma_1 - \gamma_2) \tau_s] \right] \right\}. \end{aligned}$$

Таким образом, на участке от 0 до $(\gamma_1 + \gamma_2) \tau_s$ функция является кусочно-гладкой, а в точке $(\gamma_1 + \gamma_2) \tau_s$ — имеет разрыв.

Для сравнительного анализа при оценке эффективности в табл. 3 приведены технико-экономические данные космических систем ДЗЗ.

1. Авдуевский В. С., Успенский Г. Р. Народнохозяйственные и научные космические комплексы. — М.: Машиностроение, 1985.—416 с.

2. Исащенко И. И. Космос и экономика: (характер взаимодействия)

Таблица 3. Технико-экономические показатели космических систем ДЗЗ

Название, основные характеристики системы	Стоимость, млн долл. США
«Landsat», США «Landsat-1, 2, 3» (1972, 1975, 1978) Масса — 0.95 т, многоспектральное сканирующее устройство (МСУ) с разрешающей способностью 60 м	Общие затраты на программу «Landsat» по состоянию на 1990 г. — 1000 Затраты на создание и эксплуатацию первых трех КА по состоянию на 1978 г. — 251, в том числе: НИР — 34; разработка и изготовление КА — 149; создание и эксплуатация центра обработки данных — 54; закупка трех ракет-носителей — 14
«Landsat-4, -5» (1982 и 1984 гг.) Масса — 2.2 т, МСУ с разрешающей способностью 30 м	Общие затраты на систему по состоянию на 1983 г. — 645, в т. ч. на разработку КА — 570; ежегодные расходы на эксплуатацию — 20.
«Landsat-6» (1993, потерян во время запуска) Масса — 2.75 т, МСУ с разрешающей способностью 30 м	Общая сумма затрат на систему — 256.5; МСУ — 92; запуск — 36.5; модернизация наземной станции — 2.9
«Landsat-7» (1999) Масса — 2.75 т, МСУ с разрешающей способностью 15 м	Общая сумма затрат на систему — 750; МСУ — 200
«Spot» (Франция, Швеция, Бельгия) «Spot-1» (1986), «Spot-2» (1990), «Spot-3» (1993) «Spot-4» (1998), «Spot-5» (2002) Оптический сканер HRS с панхроматическим и многозональным режимами с разрешающей способностью 10 м и 20 м соответственно. Дополнительно на «Spot-4, -5» прибор «Vegetation» (4 канала с разрешением 1 км при полосе обзора 2250 км). На «Spot-5» HRS с разрешающей способностью 5 м (2.5 м при наземной спец. обработке) и 10 м соответственно.	Полные затраты на систему, включая ее эксплуатацию в течение 2 лет — 800. Затраты на создание и запуск «Spot-1» — 315. Затраты на создание «Spot-2» — 130. Ежегодные расходы на эксплуатацию системы с двумя спутниками («Spot-1, -2») — 30. Затраты на каждую из систем «Spot-3, -4» оцениваются в 350
ERS, Европейское космическое агентство (ESA) ERS-1 (1991), ERS-1 (1995) Масса — 2.4 т, активный микроволновой прибор AMI (режим радиолокатора или скаттерометра), алтиметр (высотомер), радиометр.	Затраты на создание системы — 900. Годовые расходы на эксплуатацию — около 52
«Envisat-I», ESA (1998) Масса — 8 т, длина — 10 м, ширина — 3 м Мощность солнечных батарей — 6.5 кВт. Оснащен 10 приборами для ДЗЗ.	Общие затраты на осуществление программы — 2200, в т.ч.: на создание КА — 850, на создание наземного сегмента — 185
JERS-1, Япония (1992) Масса — 1.4 т, оснащен многозональной оптической системой с разрешением 18x24 м и радиолокатором с разрешением 18 м	Общие затраты на систему, включая эксплуатацию — 500, в т. ч. на создание КА — 350
«Radarsat-1», Канада (1995) Масса — 3.15 т, радиолокатор с синтезированной аппертурой с разрешающей способностью 25 м	Затраты на создание КА — 500
CBERS-1, -2, Бразилия — Китай (1996, 1999) Масса — 1.4 т, оптический сканер с разрешением 20 м	Общие затраты на создание системы — 200

ствия в условиях капитализма). — М.: Мысль, 1979.—228 с.
 3. Монокрович Э. И. К расчету экономического эффекта от использования агрометеорологической информации в производстве зерна // Экономическая эффективность гидрометеорологического обеспечения сельского хозяйства: Тр. казах. регионального научно-исслед. ин-та. — М.: Моск. отд. гидрометеиздата, 1982.—С. 3—14.
 4. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985.—199 с.

METHODOLOGY ASPECTS OF EFFICIENCY ESTIMATION OF SPACE REMOTE SENSING SYSTEMS

A. I. Fedyakin, V. P. Zubko, S. V. Zayats, B. M. Mamchuk

We propose the methodology of efficiency estimation of space remote sensing systems on the basis of the analysis of some economic, scientific and technical aspects with consideration for input information stochastic.

Е. Б. Кудашев

Інститут космічних досліджень РАН, Москва, Росія

Электронная библиотека спутниковых данных: доступ к коллекциям экологического мониторинга

Розглядаються проблеми створення єдиної системи автоматичної обробки інформації та розподіленого пошуку по всіх архівах космічної інформації. Описано структуру Міжнародної інформаційної системи INFEО, розробленої ESA, яка об'єднує національні архіви супутникових даних, надає користувачам спеціалізовані інтерфейси доступу до даних, забезпечує долготривале зберігання даних і дозволяє провадити пошук супутникових знімків і колекцій даних.

Формирование информационной инфраструктуры и интеграция электронных архивов спутниковых данных сейчас особенно актуальны, так как значительно вырос объем спутниковых данных дистанционного зондирования Земли. Возникает задача их систематизации, структуризации, создания средств каталогизации и поиска.

Единая система доступа ко всем существующим архивам позволяет эффективно использовать информацию, накопленную человечеством со временем развития космических технологий.

ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Тенденция развития электронных библиотек в задачах исследования Земли из космоса определяется тем, что электронные библиотеки представляют широкий класс распределенных информационных систем. Электронные библиотеки (ЭБ) — качественный скачок в области информационных технологий, связанный с развитием интернет-технологий и международных стандартов на программное обеспечение этих технологий.

Наиболее эффективными методами решения проблем доступа к данным, таким как разработка технологии централизованно-распределенного хранения данных; разработка схем метаданных с учё-

том международных и отечественных стандартов содержания и обмена данных; анализ корпоративных стандартов и согласование используемых стандартов хранения и представления информации и метаданных, являются информационные технологии, получившие название ЭБ.

Будем рассматривать ЭБ как область исследований и разработок, направленных на развитие методов обработки, хранения, поиска и анализа цифровых данных различной природы. Итак, во-первых, ЭБ — распределенные однородные коллекции цифровых объектов. Во-вторых, ЭБ — распределенное интегрированное пространство электронных ресурсов.

Методы и технологии ЭБ особенно важны для развития информационной поддержки космического мониторинга объектов природной среды и глобальных изменений климата из-за тенденции к интеграции национальных информационных ресурсов, создания единой системы автоматической обработки информации и распределенного поиска по всем национальным архивам космической информации.

Проект «Электронная библиотека спутниковых данных изменения окружающей среды и климата» развивается в Институте космических исследований РАН (ИКИ) [1, 3] как инфраструктура системы международного обмена космической информацией на основе технологий INFEО (Information about Earth Observation). Электронная библиотека

ИКИ предоставляет пользователям специализированные интерфейсы доступа к данным, обеспечивает долговременное хранение данных и позволяет производить поиск спутниковых снимков и коллекций данных.

Информационно-поисковая система построена на стандартах ISO для работы со спутниковыми данными и форматах электронного обмена массивами данных международных информационных систем распределенного поиска данных в области исследования Земли из космоса INFEO и EOSDIS (The Earth Observing System Data and Information System) для обмена спутниковыми данными. Система обеспечивает поиск по заданным атрибутам и поддерживает форматы электронного обмена массивами данных, а также унифицированный сетевой доступ к данным космического экологического мониторинга.

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ АРХИВЫ ДАННЫХ И ПРОБЛЕМА ИНТЕГРАЦИИ

Формирование информационной инфраструктуры и интеграция электронных архивов спутниковых данных особенно актуальны, так как в региональных Центрах спутникового мониторинга созданы и развиваются богатейшие электронные ресурсы. Наиболее яркими примерами таких информационных ресурсов являются спутниковые данные по лесным пожарам и динамике восстановления растительного покрова на территории России [1, 3, 4].

Созданные электронные коллекции включают данные по обширной территории России, начиная от Подмосковья и центральных регионов страны, включая Западную и Восточную Сибирь, Дальний Восток и Приморье. Оперативный спутниковый мониторинг Тихого Океана привел к созданию электронной коллекции данных по развитию тайфунов и по диагностике параметров тайфунов; карты поверхностных температур моря и тепловых структур морской поверхности. Важное направление развития информационных ресурсов космического мониторинга связано с изучением состояния окружающей среды урбанизированных территорий, построением тепловых карт и обнаружением температурных аномалий мегаполисов. Примеры созданных в рамках проекта электронных коллекций спутниковых данных представлены в работах [1, 3, 4]; с информационными ресурсами можно также познакомиться на Web-сайте ИКИ РАН «Электронная библиотека космической информации» [<http://iris.iki.rssi.ru>].

С течением времени объем космической информации значительно возрастает, в связи с чем воз-

никает естественная потребность в систематизации спутниковых данных, их структуризации, создании средств каталогизации и поиска. Первым шагом на пути решения этой проблемы является выделение из всех свойств хранимых объектов только тех, которые необходимы в рамках решаемой задачи. Конечное число выделенных атрибутов позволяет произвести классификацию хранимых данных.

Бурное развитие компьютерных и интернет-технологий создает возможности объединения информационных ресурсов в единую информационную среду и организации эффективного хранения данных [2]. Для более продуктивного использования ресурсов архива данных создаются Web-сервера баз данных, что позволяет получать необходимую информацию о спутниковых данных через сеть интернет, обеспечивая наибольший охват информации. Для обеспечения потребителей адекватными и высококачественными данными, полученными в результате долговременных дистанционных исследований, разрабатываются наземные комплексы приема и обработки космической информации.

Структура системы ввода, архивации и распределения данных и функциональная схема инфраструктуры наземного комплекса обработки, хранения и распространения спутниковых данных, разработанные в Институте радиотехники и электроники РАН, были представлены нами ранее и анализировались в докладе на Первой Всероссийской конференции электронной библиотеки [1, С. 231, 235].

Существующие архивы спутниковых данных содержат, как правило, информацию по одному научному проекту. Огромное количество и разрозненность серверов баз данных (БД) осложняют поиск полной информации по интересующей тематике. Развитие серверов баз данных основано на технологиях управления метаданными информационных систем. Более низким уровнем представления информационных ресурсов в электронной библиотеке космической информации (см. рис. 1) является уровень, предназначенный для создания и поддержки справочника (Directory Level) спутниковых информационных ресурсов: IDN (International Directory Network), FGDC (Federal Geographic Data Committee) ISITE software, NGDF (UK). На этом уровне пользователь может лишь узнать, в каком архиве данных хранится необходимая ему информация, и вынужден, перейдя по ссылке в этот архив, уже в нем повторить процедуру поиска.

Более высоким является уровень каталога; в информационной системе электронной библиотеки космической информации этот уровень представления спутниковых данных обеспечивают INFEO и IMS EOSDIS (Information Manager System). Пре-

имущество такого подхода очевидно: конечная информация по запросу пользователя ищется уже непосредственно по всем источникам; отпадает необходимость в повторных запросах по каждому источнику.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА INFEО

В Международных программах исследования Земли из космоса перспективной задачей является создание единой системы автоматической обработки информации и распределенного поиска по всем национальным архивам космической информации. На пути реализации такой системы возникает множество проблем, связанных с разнородностью применяемого программного обеспечения для реализации хранилищ и организации их внутренней структуры, разнообразия интерфейсов, моделей данных.

Международная информационная система INFEО (Information of Earth Observation), разработанная Европейским космическим агентством (ESA) и ориентированная на работу со спутниковыми данными, объединяет архивы данных, расположенные в различных частях земного шара. Система INFEО, являясь активным многоцелевым архивом космических данных, предоставляет пользователям специализированные интерфейсы доступа к данным, обеспечивает долговременное хранение данных и позволяет производить поиск спутниковых снимков и коллекций данных.

Все пользователи могут получить доступ к ресурсам INFEО через единые узлы доступа (MWND). INFEО разработана для того, чтобы поддерживать различные пользовательские интерфейсы, т. е. WWW, Z39.50, CIP и другие специфичные интерфейсы.

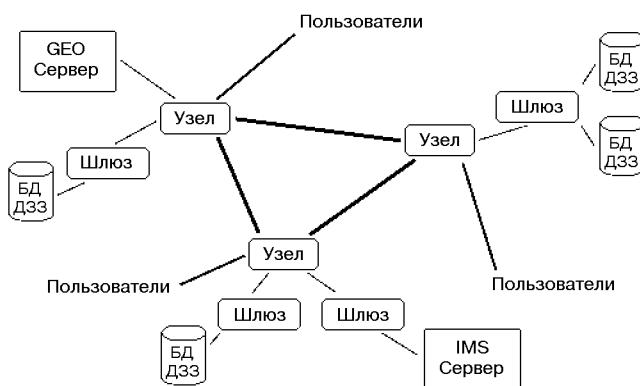


Рис. 1. Общая схема работы системы INFEО

Поставщики данных, как показано на рис. 1, имеют доступ к узлу MWND через ftp или Web для того, чтобы предоставить описание и дополнительную информацию о тех данных, которые у них имеются.

Рассмотрим INFEО Gateway — Шлюз поставщика данных. Существует большое количество возможных поставщиков для INFEО; некоторые из них могут уже иметь данные исследования земли из космоса в базе данных on-line. Поставщики, у которых лишь небольшое количество элементов, или те, кто не желает делать их доступными on-line, могут через INFEО сообщить клиентам о своей информации и предоставить им доступ через простой URL.

В системе INFEО для поставщиков с большими наборами данных предоставляется множество шлюзов. Это делается для того, чтобы минимизировать усилие, требуемое для того, чтобы соединиться с INFEО, и обеспечения механизма перевода между методом доступа к данным и INFEО стандартами.

Шлюз в информационной системе INFEО обеспечивает преобразование между протоколами INFEО, а именно Z39.50, CIP, WAIS и GILS, в формат, не зависящий от базы данных (то есть ODBC). Реализация такого механизма в INFEО возможна благодаря конфигурационным файлам.

Единые узлы доступа (MWND) обеспечивают доступ к ресурсам INFEО для поставщиков и клиентов. Узел информационной системы MWND решает следующие задачи.

- Описание коллекций данных — сюда также входит постоянный контроль за актуальностью информации.
- Библиографический поиск — поиск в библиотеках узла доступа и удаленных z39.50-совместимых узлах доступа.
- Поиск данных — поиск по локальным и удаленным CIP-коллекциям.
- Обслуживание пользователей — регистрация и обслуживание пользователей.
- Обслуживание словаря данных — управление словарем данных INFEО.
- Помощь — поддержка помощи об использовании INFEО.
- Мониторинг — ведение логов и общий контроль системы.

Наиболее важной частью системы INFEО являются шлюзы (см. рис. 2), состоящие из двух основных компонентов: брокера (Retrieval Manager) и переводчика (Translator). Брокер выполняет следующие функции:

- обработка запросов полученных от узла доступа (MNWD);

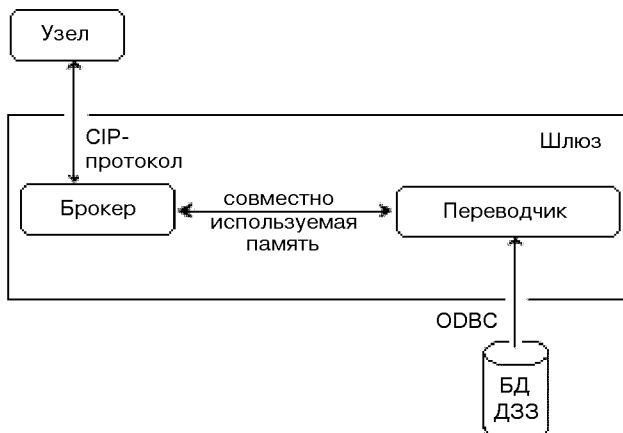


Рис. 2. Схема шлюза

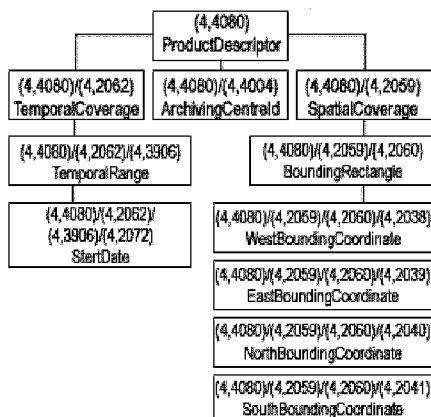


Рис. 3. Иерархическая структура атрибутов данных в протоколе CIP

- передача обработанного запроса переводчику;
- интерпретация ответа, полученного от переводчика;
- формирование и передача ответа узлу доступа.

Полученный от брокера запрос переводчик преобразует по правилам, описанным в конфигурационных файлах, в SQL запрос. Сформированный запрос передается через ODBC-драйвер серверу баз данных. Такая схема действий позволяет работать практически с любым сервером баз данных и любой

схемой данных. Полученный от сервера ответ переводчик передает брокеру.

CIP-ПРОТОКОЛ

Catalogue Interoperability Protocol основан на протоколе Z39.50 и является внутренним языком для работы системы INFEO. Все атрибуты данных в протоколе CIP находятся в иерархической взаимосвязи, показанной на рис. 3.

Например, параметру «Самая северная координата (NorthBoundingCoordinate)» соответствует номер (4.4080) / (4.2059) / (4.2060) / (4.2040). Глядя на этот номер, можно согласно схеме рис. 3 точно определить, свойства каких атрибутов унаследовал рассматриваемый параметр.

В нашем примере это «Прямоугольное ограничение (BoundingRectangle)» «Пространственное покрытие (SpatialCoverage)» «Атрибут данных (ProductDescriptor)».

- Арманд Н. А., Кравцов Ю. А., Кудашев Е. Б. и др. On-line Электронная библиотека космической информации по экологическим и природо-ресурсным фундаментальным программам // Электронные библиотеки: Перспективные методы и технологии, Электронные коллекции: Тр. Первой Всерос. науч. конф. — С.-Петербург: Изд-во С.-ПБ Гос. ун-та, 1999.—С. 239—235.
- Бездушный А. Н., Жижченко А. Б., Кулагин М. В., Серебряков В. А. Интегрированная система информационных ресурсов РАН и технология разработки электронных библиотек // Программирование.—2000.—№ 4.—С. 177—185.
- Мясников В. П., Арманд Н. А., Кравцов Ю. А. и др. Информационные технологии и информационные ресурсы космического экологического мониторинга // Вестник РФФИ.—2000.—2.—С. 30—37.
- Kravtsov Yu. A., Kudashev E. B., Golomolzin V. V., Sharakhmalyan M. A. The satellite techniques in early warning systems for large towns and megacities // Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction / Ed. J. Zschau and A. Kuppers. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.—Chapter 8.2.—P. 741—744.

AN ELECTRONIC LIBRARY OF SPACE DATA — THE ACCESS TO COLLECTIONS OF ECOLOGICAL MONITORING

E. B. Kudashev

The structure of the international information system INFEO is described.

УДК 581.1

Л. Т. Мищенко¹, Т. Куне², И. А. Мищенко¹, А. Л. Бойко¹

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Федеральний центр розведення та дослідження культурних рослин, Інститут захисту рослин і діагностики фітопатогенів, м. Ашерслебен, Німеччина

Инфекционный процесс вируса полосатой мозаики в клиностатированных растениях пшеницы Апогей

Тривале кліностатування рослин пшениці сорту Апогей загальмовує репродукцію вірусу смугастої мозаїки пшениці. У вертикально кліностатованих рослин інфекція зникає раніше, ніж у рослин з горизонтальним кліностатуванням.

ВВЕДЕНИЕ

Биологические системы жизнеобеспечения, основой которых являются растения, могут использоваться самостоятельно или в комплексе с физическими или химическими системами, чтобы обеспечить питание, регенерацию воздуха и очищение воды для членов экипажа во время длительных космических миссий. Для такой схемы огромное значение имеет высокая активность фотосинтетического аппарата, непосредственно связанная с продуктивностью растений и обеспечивается, в первую очередь, выращиванием здоровых растений.

Исследования по космической биологии проведены преимущественно на здоровых растениях [7, 13, 14, 16, 17]. В то же время стрессовые условия космоса могут стать причиной появления различных болезней в растениях, особенно вирусных, которые на Земле могут оставаться в латентной форме. Практически не изученным остается состояние вирусифицированных растений в условиях космического полета. Пшеница нами выбрана в качестве объекта исследования, так как она может стать полезной диетой, богатой на белок и витамины для космонавтов во время длительных полетов. Из-за широкого распространения фитовирусов изучалось влияние моделированной микрогравитации, т. е. трансформированной среды, на физиологические и продукционные процессы здоровых и вирусифицированных растений пшеницы различного

географического происхождения. В результате были выявлены сорта с высоким адаптационным потенциалом [5, 15]. Инфекционный процесс фитовирусов в трансформированной среде ранее не изучался, за исключением отдельных работ [1, 6].

Целью настоящей работы было исследовать динамику инфекционного процесса вируса полосатой мозаики пшеницы (ВПМП) в растениях яровой пшеницы сорта Апогей при разных условиях клиностатирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на универсальном клиностате «Цикл-2», который реализует несколько схем переориентации растений относительно вектора силы земного тяготения (рис. 1). Объектом исследования была суперкарликовая пшеница сорта Апогей. Контрольные (неподвижные) и опытные растения выращивали в специальном помещении с контролированным микроклиматом и освещением 10000 лк в режиме «день/ночь» 16/8 ч при температуре 21 ± 1 °С. В фазе двух листьев половину растений в клиностате и неподвижном контроле искусственно инфицировали ВПМП. Вирус уникalen своей высокой специфичностью, потому безопасен для других растений, экипажа, самих летательных аппаратов и может быть использован для космических исследований. Растения выращивали в

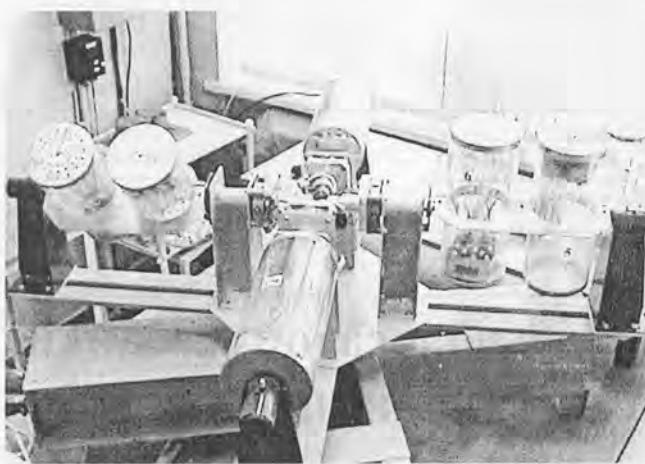


Рис. 1. Растения пшеницы Апогей в клиностате «Цикл-2»

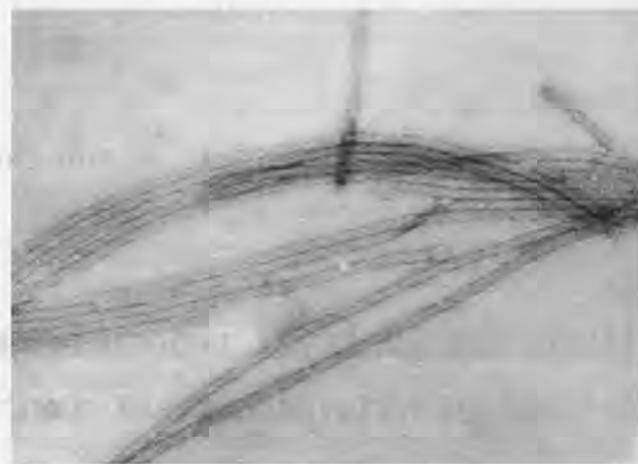


Рис. 2. Электронограмма очищенного препарата ВПМП. Инструментальное увеличение 40000

специальных контейнерах из оргстекла по 35 штук в каждом. Клиностатирование было в горизонтальном и вертикальном режиме при 2 об/мин; в вертикальном было два варианта: $R = 1.0$ и $R = 1.6$, где R — расстояние от центра вращения клиностата до центра вращения контейнеров (условный радиус); скорость вращения платформы — 1 об/мин. Для изучения морфологии вирусов использовали трансмиссионные электронные микроскопы JEM-1200 (JEOL, Япония), ЭМ-125 (Сумы, Украина) с негативным контрастированием вирусных частиц, и ультратонкие срезы тканей инфицированных листьев. Выделение и очистку ВПМП проводили по методике [8] в нашей модификации.

Суть метода заключалась в следующем. Листья с симптомами поражения ВПМП промывали дистиллированной водой, подсушивали на фильтровальной бумаге, взвешивали и измельчали на мясорубке. Гомогенат заливали двумя объемами (мл/г) 10 мМ K_2HPO_4 , доводя pH до 6.1 с помощью 1.0 М уксусной кислоты и выдерживали сутки при температуре +4 °C. Отжимали сок и центрифугировали его 30 мин при скорости 5000 об/мин. Надосадочную жидкость доводили до pH = 7.5...8.0 с помощью 1.0 M NaOH и смешивали с 10 мМ лимоннокислым натрием 1:1 и потом прибавляли 1 % тритон X-100 на мешалке (30 мин). Экстракт центрифугировали 1.8 ч со скоростью 27000 об/мин при 5 °C в роторе № 30 центрифуги УЦП 2-85. Надосадочную жидкость сливали, а осадок ресуспендировали и смывали 10 мМ лимоннокислым натрием (pH 8.0). Вирусодержащий материал после отмывания ставили на ночь на магнитную мешалку. Потом этот материал

освещали 5 мин (5000 об/мин на центрифуге K-23).

Наслаивали вирусодержащий материал на 4 мл 20 % сахарозной подушки на 10 мМ лимоннокислом натрии (pH 8.0) и центрифугировали (25000 об/мин, 3 ч, +5 °C) на ультрацентрифуге L5-50B («Beckman», США). Осадок ресуспендировали 10 мМ лимоннокислым натрием (pH = 8.0) и ставили на ночь на магнитную мешалку. Освещали 5 мин на K-23 при скорости 5000 об/мин. Вирусодержащий материал (2-4 мл) наслаивали на линейный градиент сахарозы 10—40 % (V/V), который готовили на 10 мМ лимоннокислом натрии и центрифугировали 3 ч при 27000 об/мин в роторе SW-40 «Beckman». Осадок ресуспендировали 10 мМ лимоннокислым натрием (pH 8.0) и ставили на ночь на магнитную мешалку. Диализировали против 0.1 M лимоннокислого натрия (pH 6.5). Чистоту очищенного препарата ВПМП проверяли спектрофотометрически на «Specord M40 UVVIS» («Carl Zeiss Yena», Германия), по соотношению E260/E280, которое составляло 1.32, что характерно для потивирусов [8].

Вирус полосатой мозаики пшеницы является типичным представителем рода *Tritimovirus* семейства *Potyviridae* (потенцирусов), для которого характерные нитевидные вирионы с модальной длиной около 700 нм (рис. 2). Для получения поликлональной иммунной сыворотки к ВПМП мы использовали серию внутривенных инъекций каждые 2-3 дня такими дозами очищенного вируса: 60—60—90—90—120 (мкг). Внутримышечная инъекция вводилась через три месяца с 200 мкг вируса, смешанно-

смешанного с таким же объемом адьюванта Фрейнда. Сыворотку получали по стандартной методике [4].

Вирусологические методы диагностики ВПМП, которые являются традиционными (электронная микроскопия, иммунофлуоресценция, иммунодифузия в агаре и т. д.) имеют свои недостатки: неколичественное определение, относительно низкая чувствительность и специфичность, трудоемкость серийных определений. Иммуноферментный анализ (ИФА) исключает эти недостатки, не зависит от морфологии вирионов и обеспечивает высокую точность и специфичность. Он превышает другие методы по чувствительности и специфичности. Этот метод использовали при изучении тонкой структуры различных таксономических групп фитовирусов [9—12], для установления антигенного и филогенетического родства [3, 18]. Именно поэтому для определения динамики инфекционного процесса ВПМП был использован твердофазный иммуноферментный анализ в непрямом варианте РТА (plate trapped antigen) — ELISA.

Суть метода заключалась в следующем. Для иммобилизации антигена на плашках мы использовали 0.05 М карбонатный буфер (рН 9.6). Экстракты растений в карбонатном буфере просветляли на протяжении 20 мин низкоскоростным центрифугированием («Centrifuge 5415 D», Eppendorf) при скорости 5000 об/мин. В лунки полистироловых микроплат фирмы «Sarsted» (США) или «Nunc polysorp» (Дания) вносили по 100 мкл соответствующего разведения сока и инкубировали на протяжении 16—18 ч при +4 °C для сорбции антигена. Неадсорбированный материал удаляли, микроплаты промывали три раза 0.1 М фосфатно-солевым буфером с добавлением 0.2 % твина-20 рН 7.4 (ФСБТ). На следующем этапе в лунки вносили по 100 мкл 1 % бычьего сывороточного альбумина (БСА) («Sigma», США) и инкубировали в течение 60 мин при 37 °C, микроплаты снова отмывали и вносили по 100 мкл антисыворотки к ВПМП (1/5000). После внесения антисыворотки планшеты инкубировали 120 мин при 37 °C или 16—18 ч при +4 °C, сыворотку удаляли и промывали три раза ФСБТ. Потом вносили по 100 мкл меченного пероксидазой антивидового коньюгата (антитела козы против глубулинов кроля фирмы «Sigma») в рабочем разведении 1/20000, инкубировали 60 мин при 37 °C, промывали четыре раза ФСБТ и вносили по 100 мкл субстратной смеси на основе ортофенилдиамина (ОФД) фирмы «Fluka», Швейцария. Оптическую плотность продукта ферментативной реакции оценивали через 30 мин инкубации при комнатной температуре на ридере фирмы «Termo Labsystems

Opsys MR» (США) с программным обеспечением Dynex Revelation Quicklink, при двух длинах волн 492 / 620 нм. Останавливали пероксидазную реакцию внесением раствора 2 М серной кислоты. При определении ВПМП в очищенных препаратах в качестве контроля служил очищенный препарат ВТМ, а при анализе растительного материала, зараженного ВПМП, в качестве контроля использовали сок безвирусных растений в одних и тех же разведениях, что и анализируемый материал. Для контроля специфичности антисыворотки к ВПМП ставили реакцию с соком здоровых растений и гетерологичным антигеном — вирусом табачной мозаики. Анализировали образцы в 3-4 повторностях. Реакцию считали положительной, если оптическая плотность продукта ферментативной реакции исследовательских образцов превышала больше чем в два раза показатели отрицательного контроля. Статистическую обработку проводили методом дисперсионного анализа по Доспехову [2] с использованием соответствующих программ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении агроэкологического мониторинга пораженности посевов озимой пшеницы вирусными инфекциями в Украине наиболее распространенным и вредоносным оказался вирус полосатой мозаики пшеницы (ВПМП), представленный на рис. 2. Вирус является очень удобным для модельных лабораторных исследований, так как может передаваться механически как и в природных условиях — клещом *Aceria tulipae* или *Aceria tritici Schev.* (в Украине).

Исследования динамики инфекционного процесса в растениях пшеницы Апогей (весенняя вегетация) показало, что на 8-9-е сутки после инфицирования методом ELISA выявлен вирус при горизонтальном и вертикальном $R = 1.0$ клиностатировании (рис. 3, а и б), а на 10-11-е сутки — в варианте $R = 1.6$ в титре 1/2560 (рис. 3, в). Начиная с 8-х по 18-е сутки в варианте с горизонтальным вращением контейнеров ВПМП репродуцируется в высоком титре 1/2560, позднее титр вируса снижается: на 23-и сутки до 1/80, а на 25-е сутки методом ELISA вирус не регистрируется (рис. 3, а). При вертикальном клиностатировании $R = 1.0$ репродукция ВПМП выявляется на 8-9-е сутки, титр составляет 1/320 (рис. 3, б), потом увеличивается с 11-х по 14-е сутки и составляет 1/2560.

На 16-е сутки титр вируса снижался до 1/640, а начиная с 18-х суток и к концу эксперимента (40 сут) вирус не обнаруживался вовсе.

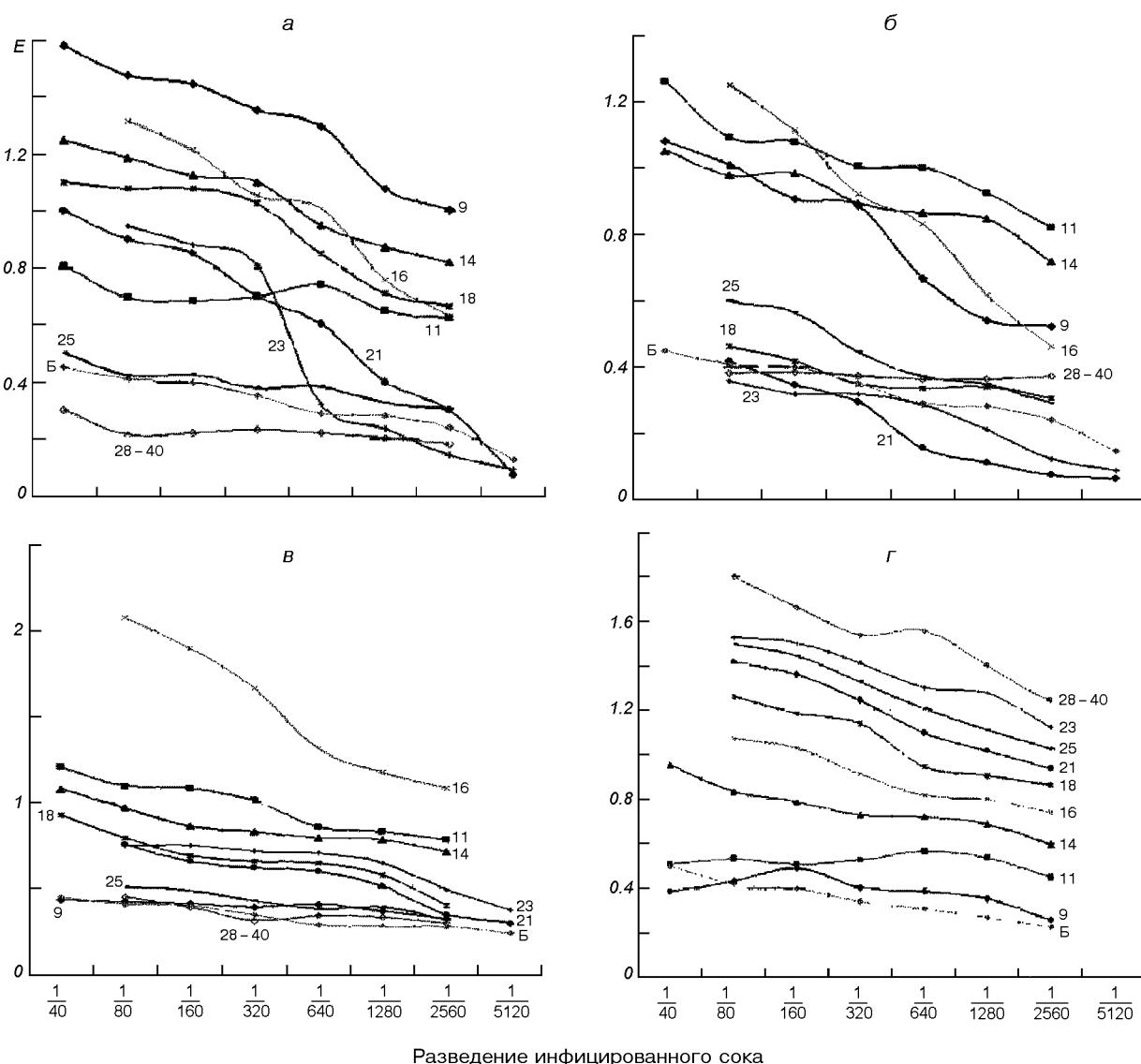


Рис. 3. Динамика репродукции ВПМП: *а* — при горизонтальном клиностатировании; *б* — при вертикальном ($R = 1.0$) клиностатировании; *в* — при вертикальном ($R = 1.6$) клиностатировании; *г* — в наземном неподвижном контроле. Показана зависимость оптической плотности E для $\lambda = 492$ нм от разведения инфицированного сока для разных длительностей эксперимента (цифры у кривых, сут). Кривая Б — безвирусные растения

С опозданием на 1-2 сут развивалась инфекция у растений, клиностатированных при $R = 1.6$ (рис. 3, в). В инокулированных растениях вирус регистрировался в титре 1/2560 начиная с 11-х по 16-е сутки, к 23-м суткам титр вируса снижался до 1/1280, а начиная с 25-х суток до конца эксперимента ВСМП в растениях пшеницы не выявлялся.

Иначе проходил инфекционный процесс ВПМП в неподвижных вариантах. По данным ELISA в не-

подвижных вариантах репродукция вируса выявлялась на 2 сут позже, чем при горизонтальном и вертикальном $R = 1.0$ вращении, и на 1 сут позже, чем при вертикальном $R = 1.6$ клиностатировании. Но начиная с 14-х суток и до конца эксперимента (40 сут) отмечалась репродукция ВПМП в высоком титре: 1/2560 (рис. 3, г). Более позднее появление вируса в неподвижных вариантах можно объяснить повышенной стойкостью пшеницы к ВПМП из-за

отсутствия стрессора — клиностатирования.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что длительное клиностатирование яровой пшеницы Апогей угнетает репродукцию вируса полосатой мозаики пшеницы.

1. Диденко Л. Ф., Пархоменко Н. И., Максименко Л. А. и др. Влияние клиностатирования на вирус курчавой карликовой картофеля *in vitro* и *in vivo* // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 118—122.
2. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). — М., 1985.—351 с.
3. Какарека Н. Н. Сравнительная антигенная характеристика капсидных белков потвирусов (далnevосточные изоляты) и их иммунодиагностика: Автoreф. дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток, 1995.—20 с.
4. Кэтти Д. Антитела. Методы. — М.: Мир, 1991.—281 с.
5. Мищенко Л. Т. Влияние моделированной микрогравитации на ростовые процессы и фотосинтетический аппарат растений *Triticum aestivum L.*, инфицированных вирусом полосатой мозаики пшеницы // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 66—70.
6. Мищенко Л. Т., Бойко А. Л., Чернюк С. О. Вплив кліностатування на показники серологічного аналізу вірусу смугастої мозайки пшениці в рослинах *Triticum aestivum* // Біополімери і клітіна.—1999.—15, № 4.—С. 319—323.
7. Bingham G. E., Jones S. B., Or D., et al. Microgravity effects on water supply and substrate properties in porous matrix root support systems // Acta Astronaut.—2000.—47, N 11.—P. 839—848.
8. Brakke M. R. Degradation of Wheat Streak Mosaic Virus Capsid Protein During Leaf Senescence // Phytopathology.—1990.—80, N 12.—P. 1401—1405.
9. Fomitcheva V. W., Ehrig F., Richter K., Kühne T. Serological analysis of the two RNA2-encoded proteins of barley mild mosaic virus // J. Plant Diseases and Protection.—1999.—106, N 3.—P. 265—274.
10. Koenig R. ELISA in the study of homologous and heterologous reactions of plant viruses // J. Gen. Virol.—1978.—40, N 2.—P. 309—318.
11. Koenig R. Indirect ELYSA methods for the broad specificity detection of plant viruses // G. Virol.—1981.—55, N 1.—P. 53—62.
12. Koenig R., Paul H. Z. Variants of ELISA in plant viruses diagnosis // J. Virol. Meth.—1982.—5, N 2.—P. 113—125.
13. Kordyum E. L. Biology of plant cell in microgravity and under clinostating // Int. Rev. Cytol.—1997.—171.—P. 1—78.
14. Kordyum E. L. Gravisensitivity of Plant Cells: Status and Prospects // Proc. «Life in Space for Life on Earth» 23rd Annual Int. Gravitational Physiology Meeting. — Stockholm, Sweden, 2002.—P. 305—306.
15. Mishchenko, L. T., Silayeva A. M. Effect of Clinostating on Physiological and Biochemical Characteristics of Wheat Plants Infected by the Streak Mosaic Virus of Wheat (SMVW) // Horticulture and Vegetable Growing (Lithuania).—1998.—17, N 3.—P. 386—394.
16. Monje O., Bingham G. E., Carman J. G., et al. Canopy photosynthesis and transpiration in microgravity, gas exchange measurements aboard Mir // Adv. Space Res.—2000.—26, N 2.—P. 303—306.
17. Musgrave M., Kuang A., Brown C., Matthews S. Changes in *Arabidopsis* leaf ultrastructure, chlorophyll and carbohydrate content during space flight depend on ventilation // Ann. Bot.—1998.—81.—P. 503—512.
18. Rabenstein F., Seifert D. L., Schubert J., et al. Phylogenetic relationships, strain diversity and biogeography of tritiviruses // J. Gen. Virol.—2002.—83.—P. 895—906.

INFECTION PROCESS OF WHEAT STREAK MOSAIC VIRUS IN CLINOSTATED APOGEE WHEAT PLANTS

L. T. Mishchenko, T. Kühne, I. A. Mishchenko, A. L. Boyko

A long-term clinostating of Apogee wheat plants impedes the wheat Streak mosaic virus reproduction. The infection disappears sooner in vertically clinostated plants than in horizontally clinostated ones.

До 85-річчя від дня народження
президента Національної академії наук України
академіка Б. Є. Патона



27 листопада 2003 р. виповнюється 85 років від дня народження президента Національної академії наук України академіка Б. Є. Патона.

Борис Євгенович Патон — видатний вчений в галузі зварювання, металургії і технології металів, який має світову відомість і визнання. Він автор багатьох основоположних досліджень і створених на їхній основі високих технологій, найталановитіший організатор науки, визначний державний і громадський діяч. Йому притаманна виняткова здатність передбачати перспективні тенденції розвитку науки, що відіграють вирішальну роль на певному етапі науково-технічного прогресу.

Б. Є. Патон творчо розвинув ідеї, продовжив справу, розпочату його батьком академіком С. О. Патоном — найкрупнішим вченим, засновником Інституту електрозварювання, — і досяг нових вершин у науці.

Протягом 50 років він очолює всесвітньо відомий академічний Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, що виріс у потужний науково-технічний комплекс, до структури якого входять науково-дослідний інститут, конструкторсько-технологічні й експериментальні підрозділи, три дослідні заводи, а також інноваційні організації, науково-інженерні й атестаційні центри.

Під керівництвом Б. Є. Патона і за його особи-

стою участю в Інституті проведено глибокі дослідження й отримано великі результати в розробці прогресивних технологій нероз'ємного з'єднання й обробки металів і неметалів у різних умовах і середовищах. До них належать зварювання і наплавлення під флюсом, зварювання в захисних газах суцільним і порошковим дротом, електрошлакове зварювання, стикове зварювання оплавленням, газотермічне напилювання, променеві технології та інші процеси.

Фундаментальні дослідження Б. Є. Патона і його учнів щодо взаємодії зварювальних джерел нагрівання з розплавленим металом заклали основу для створення нової галузі металургії — спеціальної електрометалургії. Завдяки їй стало можливим лиття особливо чистих спеціальних сталей і сплавів, кольорових металів, одержання унікальних композиційних матеріалів. Відкрилися перспективи для створення новітніх конструкційних і функціональних матеріалів ХХІ століття.

Борис Євгенович уніс великий вклад у створення нових типів зварювальних конструкцій, індустріальних способів зварювання магістральних трубопроводів, великогабаритних резервуарів для зберігання нафти, кожухів доменних печей, висотних баштових конструкцій.

Академік Б. Є. Патон першим почав і розвинув дослідження з використання зварювальних процесів у космічній технології, виконаних космонавтами при орбітальних польотах кораблів і в умовах відкритого космосу. Він визнаний лідер у цій галузі.

В останнє десятиліття у коло наукових інтересів Патона-вченого увійшла проблема пошуку оригінальних медичних технологій і розробка унікальних зразків медичної техніки й інструментів. Під його керівництвом співробітники Інституту і вчені-медики створили новий спосіб з'єднання (зварювання) м'яких тканин людини і тварин, що широко використовується нині в хірургічній практиці.

Понад 40 років Б. Є. Патон є президентом Національної академії наук України, яка під його керівництвом перетворилася на один з найбільших наукових центрів Східної Європи, широко відомий в усьому світі. Вона відігравала й відіграє важливу роль у житті суспільства і держави, у прогресі

науки й освіти, у зміцненні обороноздатності і розвитку народного господарства України.

З самого початку найважливішим напрямом організаторської діяльності Патона-президента став всесвітній розвиток фундаментальних досліджень і створення на їхній основі новітніх технологій для широкого промислового застосування, орієнтування академічних інститутів на цей шлях.

Постійну увагу Борис Євгенович приділяв комплексності і пріоритетності наукового пошуку з найважливіших проблем природничих, технічних і соціогуманітарних наук. Ініціатива Б. Є. Патона максимально залишила наукові установи до вирішення виробничих і екологічних проблем на місцях проявилася в організації 7 академічних регіональних наукових центрів, що охоплюють всі області України.

Його прагнення поставити досягнення вчених на службу економіці, галузям промисловості і сільському господарству відбилося в розвитку цілеспрямованих фундаментальних досліджень, активній участі академічних інститутів у науково-технічних програмах різного рівня.

Успішній реалізації наукових результатів, їхньому використанню на промисловому рівні сприяли створена в Академії при керівній ролі Б. Є. Патона дослідно-виробнича і конструкторська база, інженерні центри, а також сформовані потім науково-технічні комплекси, у тому числі міжгалузеві.

Нова сторінка в багатогранній діяльності Б. Є. Патона відкрилася в роки незалежності України. Як член Ради з питань науки і науково-технічної політики при Президентові України і Ради національної безпеки і оборони України Борис Євгенович зробив великий особистий внесок в адаптацію Національної академії наук і всієї науки України до умов ринкової економіки. Як голова Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки він невпинно піклується про авторитет і престиж праці вчених. Великого значення Б. Є. Патон надає інноваційній діяльності, формуванню й удосконаленню перших в Україні технопарків.

Важливу роль відіграє Б. Є. Патон у справі координації діяльності державних академій наук у нашій країні, співпраці з вузами, розширення їхньої взаємодії в інтересах розвитку науки і держави в цілому.

З великим натхненням академік Б. Є. Патон дбає про наукову молодь, якій належить майбутнє, про залучення молодих талантів до наукової роботи в інститутах і аспірантури. Він завжди пов'язує під-

готовку молодих кадрів з пропагандою та покращенням умов складної, але важливої для суспільства праці вченого.

Борис Євгенович докладає багато зусиль для збереження й розвитку міжнародного наукового співробітництва Академії, зовнішньоекономічних зв'язків її інститутів з діловими партнерами зарубіжних країн. Це співробітництво проявляється в активній участі вчених Академії щодо реалізації міжнародних наукових програм, організації спільнотих лабораторій і виробництв, широкому обміні інформацією, укладанні численних ліцензійних угод і контрактів.

Академік Б. Є. Патон є одним із засновників і протягом 10 років беззмінним президентом Міжнародної асоціації академій наук, що об'єднує національні академії наук, а також ряд провідних наукових центрів країн СНД.

Б. Є. Патон — почесний президент Міжнародної інженерної академії, член Академії Європи, почесний член Римського клубу. Він є дійсним членом Російської академії наук, іноземним членом Шведської королівської академії інженерних наук, Національної академії наук Індії, академій наук і науково-технічних товариств багатьох інших країн.

Тривалий час Борис Євгенович поєднував напружену наукову діяльність з державною на високих посадах заступника Голови Верховної Ради СРСР і члена Президії Верховної Ради України.

Як людина, вчений і громадянин Б. Є. Патон має неперевершенні якості вести за собою в ім'я високої мети великих колективів вчених і організаторів науки, захоплювати їх невичерпним ентузіазмом, створювати сприятливі для творчості умови. Він завжди швидко й вчасно відгукується і на проблеми, що виникають у колег, і на потреби економіки, держави.

Його самовіддану подвійницьку працю відзначено численними науковими й державними нагородами і преміями. Він нагороджений Золотими медалями ім. М. В. Ломоносова і С. І. Вавілова, Золотою медаллю ім. Л. Лозанна Асоціації металургів Італії, Золотою медаллю ім. В. Г. Шухова; Союзу інженерів і науково-технічних товариств Росії, Золотою медаллю Всесвітньої організації інтелектуальної власності, Срібною медаллю ім. Ейнштейна ЮНЕСКО.

За величезні заслуги Б. Є. Патона удостоєно Ленінської і Державної премій, високих звань двічі Героя Соціалістичної Праці і Героя України, чотириєх орденів Леніна, орденів Трудового Червоно-го Прапора, Дружби народів, князя Ярослава Мудрого V ступеня.

**Етика вченого та організатора науки.
Штрихи до портрету академіка Б. Є. Патона**

Одна зі складових високого авторитету Б. Патона є його різnobічна наукова діяльність, спрямована на вирішення нагальних проблем суспільства. Йому притаманна виняткова здатність передбачати розвиток перспективних тенденцій наукових досліджень, результати яких відіграють вирішальну роль на певному етапі науково-технічного і соціального прогресу з обов'язковим врахуванням основних принципів сучасної етики.

Будучи спеціалістом у галузі технічних наук, очолюючи широковідомий у світі Інститут електрозварювання НАН України, Б. Патон постійно орієнтує співробітників на необхідність дбати не лише про високі техніко-економічні показники створюваних ними новітніх технологій, а й про людей, які їх застосовують.

Так, коли у 50-60-х роках ХХ століття в СРСР було розпочато спорудження гіантських нафто- і газопроводів з Сибіру у західні райони країни, постала нагальна проблема замінити ручне зварювання труб на автоматичне. Під його керівництвом було створено автоматичну установку, завдяки якій відпала потреба тисячам робітників-зварників у сильні морози, що сягали 40 і більше градусів за Цельсієм, працювати на відкритому повітрі. Водночас за завданням Б. Патона у стислий строк було розроблено і налагоджено виробництво зручного теплого одягу і взуття з електрообігрівом для багатьох тисяч робітників, які взимку виконували різні роботи на відкритому повітрі. Він запропонував групі співробітників очолюваного ним Інституту при розробці нової високопродуктивної технології дугового зварювання об'єднатися з медиками, у результаті чого вдалося не тільки істотно підвищити продуктивність праці 7 мільйонів робітників-зварників, а й створити для них набагато більші умови для праці і запобігти низці професійних захворювань. Саме за останнє група науковців-електрозварників і медиків одержала Державну премію СРСР.

Як відомо, академік Б. Є. Патон першим започаткував дослідження у відкритому космосі в галузі технологій металів, створення унікальних конструкцій. У 1969 р. під безпосереднім керівництвом Б. Є. Патона було здійснено експеримент зі зварювання в навколоzemному просторі. На пілотованому космічному кораблі «Союз-6» космонавт В. М. Кубасов на спеціально створеній в інституті електро-

зварювання установці «Вулкан» провів перші досліди з електронно-променевого, плазмово-дугового зварювання та зварювання плавким електродом. Вдалося виявити особливості формування зварних швів в умовах невагомості й довести, що під час роботи в космосі можна одержати щільні та добре сформовані зварні шви.

У 1979 р. було успішно перевірено в космічних умовах ідею нанесення різноманітних металевих покріттів на поверхні окремих елементів космічної станції і приладів, які знаходилися у космічному вакуумі. Для цього було розроблено спеціальний апарат «Випаровувач», створено універсальний ручний інструмент (УРІ) для зварювання, паяння і нанесення покріттів. Випробування УРІ в космосі провели в 1984 р. космонавти С. Є. Савицька і В. О. Джанібеков. За ефективної участі Б. Є. Патона було розроблено спеціальну конструкцію та обладнання робочого місця С. Савицької та В. Джанібекова, що забезпечило їм цілковиту безпеку під час роботи у відкритому космосі. Уперше в світі у відкритому космосі були проведені винятково важливі дослідження і здійснені перше практичне зварювання, різання і напилення металів.

Цим експериментом розпочався цикл систематичних багатоцільових досліджень і експериментів з відпрацюванням конструкційних елементів і технології спорудження великоважливих орбітальних конструкцій та об'єктів. У 1986 р. у космосі було побудовано фермову конструкцію завдовжки 12 м (експеримент «Маяк»). У 1991 р. на орбітальній станції «Мир» збудовано дві орбітальні фермові конструкції сонячних батарей багаторазового використання завдовжки 15 м кожна, які в 1994 р. космонавти склали у спеціальні контейнери, перенесли на нове місце на поверхні станції, розгорнули і знову ввели в дію. У 1997 р. було розгорнуто одну з таких фермових конструкцій, що зберігалася на станції «Мир» протягом двох років, завдяки чому станцію було забезпечене енергією.

Багаторічні роботи зі зварювання в космосі узагальнені в монографії «Welding and related technologies in Space», яку було надруковано у 1997 р. видавництвом «Cambridge International Science Publishing».

Недавно Б. Патон висунув сміливу ідею про застосування електрозварювання у медицині. Створений ним колектив електрозварників і медиків цю

ідею обґрутував теоретично, довів експериментально і реалізував на практиці. На сьогодні вже виконано понад 500 відкритих та лапароскопічних хірургічних операцій на жовчному міхурі, печінці, кишечнику та інших органах черевної порожнини і перші операції на легенях. Одержані результати перевершили сподівання хірургів. Не було жодного випадку після операційних ускладнень. Крім того, застосування в клінічній хірургії зварювального медичного обладнання та відповідних технологій виключає наявність у прооперованому органі або тканині сторонніх матеріалів з усіма можливими негативними наслідками, забезпечує повну герметичність з'єднання, скорочує тривалість хірургічного втручання й наркозу, суттєво знижує втрати крові, зменшує час відновлення морфологічної структури і фізіологічних функцій прооперованого органу. Електrozварювальні технології в гінекологічній практиці дозволили досягти того, що у більшості випадків неможливо було зробити при використанні загальноприйнятної методики деяких хірургічних операцій, передусім повністю відновити функцію маточних труб. Отже, повернути жінкам втрачену можливість народити дитину.

Творчий колектив українських зварників та медиків вже одержав патенти на низку своїх відкриттів у США та Європі. Дослідники продовжують працювати спільно з групою американських хірургів на чолі з професором Джоном Куцом та при підтримці Міжнародної асоціації зварювання та американського концерну в галузі менеджменту, який очолює Дж. Роббінс. Американці оцінили досягнення наших спеціалістів як сучасну революцію в хірургії.

Академіку Б. Патону притаманне глибоке відчуття ролі і місця сучасної науки у вирішенні, перш за все, гуманістичних проблем розвитку суспільства. Приділяючи велику увагу розробці і впровадженню сучасних науковоємних технологій у виробництво, він водночас домагається здійснення обґрунтованих наукових оцінок щодо можливого негативного впливу їх на природне середовище, біологічне та ландшафтне різноманіття, життєдіяльність людини. Такий напрям наукового пошуку в НАН України неухильно реалізується. Передусім, це стосується прогнозних оцінок, здійснених в 70-х роках ХХ століття щодо можливих негативних екологічних та соціально-економічних наслідків великомасштабних осушувальних та зрошувальних меліорацій в Україні, будівництві атомного енергокомплексу на її території, інтенсивної хімізації сільськогосподарського виробництва, перекидання частини стоку р. Дунай у Дніпро тощо. Прогнозні оцінки зі згаданих проблем, здійснені великим колективом вчених під керівництвом ака-

demіка Б. Патона, дали можливість підготувати обґрунтовані наукові рекомендації владним структурам.

І сьогодні, через 25—30 років після їхнього здійснення, вони підтвердженні життям і не втратили своєї актуальності. Ще в 1981 році до владних структур держави за підписом академіка Б. Патона була надіслана наукова записка «Про заходи стосовно подальшого посилення роботи щодо оцінки та прогнозування генетичних наслідків забруднення оточуючого людину середовища в Українській РСР». В листопаді 1981 року академік Б. Патон зробив на засіданні Уряду України доповідь про можливі негативні екологічні та соціально-економічні наслідки будівництва та експлуатації на території України атомних електростанцій і, перш за все, Чорнобильської АЕС. На превеликий жаль, події у квітні 1986 року на ЧАЕС, що стали відомі у всьому світі, повністю підтвердили його застереження.

За ініціативою академіка Б. Патона в 1977 році було розпочато цілеспрямовану роботу з розробки наукових основ створення на території України національної мережі біосферних резерватів ЮНЕСКО. Сьогодні ця мережа включає в себе Чорноморський, «Асканія-Нова», Карпатський, Дунайський і Шацький національні резервати та міжнародні транскордонні — польсько- словацько-український «Східні Карпати» та румунсько-український «Дельта Дунаю».

За ініціативою академіка Б. Патона і при його безпосередній участі було підготовлено і видано три томи наукових праць провідних вчених України «Проблеми сталого розвитку України», в яких здійснено науковий аналіз процесів, що відбулися в Україні від Ріо-де-Жанейро (1992 р.) до Йоганнесбурга (2002 р.).

Велике місце у науковій, організаторській та громадській діяльності Б. Є. Патона належить утвердженню високих етических засад у життєдіяльності суспільства і держави, в соціально-гуманітарних науках, у функціонуванні наукового співтовариства.

Завдяки зусиллям Б. Є. Патона у роки незалежності України вченими НАН України, науковою громадськістю країни в цілому, здійснено велику роботу з подолання негативної спадщини тоталітарного суспільства, усунення викривлень морально-етичних засад наукової сфери, відновлення етических традицій української науки, закладених її корифеями у — на початку ХХ ст. Очолюваною Б. Є. Патоном комісією здійснено політичну і громадську реабілітацію кількасот українських вчених та громадських діячів, які стали жертвами незаконних репресій. Українській і світовій науці поверну-

то їхню творчу спадщину. Відтворено справжню історію заснування і перших років діяльності Національної академії наук України.

Протягом останніх 10—15 років під керівництвом Б. Є. Патона в Україні розгорнуто широку мережу академічних установ соціально-гуманітарного профілю, необхідних для утвердження гуманітарної культури, моральних зasad життя держави і суспільства. Відроджені такі важливі наукові напрями, як філософія людини і культури, етика і естетика, культурологія у її загально визнаних вимірах, історія української і світової культури, археографія, етнологія, релігієзнавство, історична біографістика, сходознавство.

Великою заслугою Б. Є. Патона стала незмінна підтримка починаючи ще з 60-х рр. ХХ ст. формування навколо академічного Інституту філософії Київської філософської школи, яка у своїх дослідженнях звернулася до проблем гуманізму, філософії людського життя, культури, закладених ще у XVIII ст. Г. С. Сковородою традицій української морально-етичної «філософії серця», далеко вийшовши за коло усталеної на той час в СРСР філософської проблематики.

В наш час ці філософські світоглядні напрацювання багато в чому стали безпосередньою основою розробленої під керівництвом Б. Є. Патона «Концепції розвитку гуманітарної сфери України» (Київ, НАН України, Секція суспільних і гуманітарних наук, 2000.—134 с.), яка спрямована на загальне піднесення ролі гуманітарних, зокрема — морально-етичних чинників в житті українського суспільства. Велике місце у Концепції, яка здобула схвалення Уряду і громадськості, належить утвердженню нових гуманістичних підходів до осмислення співвідношення між людиною, державою і суспільством, місця і ролі особи, проблем її духовної, світоглядної, релігійної свободи.

Важливим внеском у відродження і злагодження духовних основ національного розвитку, інтеграцію традицій і вироблених минулими поколіннями морально-етичних норм у життя сучасного суспільства стало створення під керівництвом і за загальною редакцією Б. Є. Патона фундаментальної п'ятитомній «Історії української культури», три томи якої вже побачили світ (Київ, «Наукова думка», 2001—2003).

У своїй науковій та науково-організаційній діяльності, у численних виступах на вітчизняних та міжнародних наукових форумах, а також у засобах масової інформації, Б. Є. Патон постійно наголошує на тому, що надмірне зростання матеріальних багатств за певних умов може відбуватися за рахунок духовного зубожіння, і, отже завдати шкоди прогресу в цілому. Тому необхідно особливу увагу звернути на культуру, взагалі інтелектуальну діяльність, оскільки саме розвиток особистості людини і примноження духовних скарбів суспільства є основою розвитку цивілізації.

Видатний внесок Б. Є. Патона у розвиток вітчизняної науки, її гуманістичних цінностей та етических вимірів здобув визнання у світі. Міжнародна діяльність Президента Національної академії наук України насамперед спрямована на інтеграцію гуманітарної сфери нашої країни в загальноєвропейський та загальносвітовий процеси. При цьому Борис Євгенович Патон виходить з пріоритетів сприяння поширенню гуманістичних, демократичних цінностей, захисту прав та гідності людини на глобальному, континентальному і національному рівнях.

Основні дати життя і діяльності академіка Б. Є. Патона

Борис Євгенович Патон народився 27 листопада 1918 р. у Києві.

1936 р. Закінчив київську середню школу № 79.

1941 р. Закінчив Київський індустриальний інститут (нині Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»).

Інженер електротехнічної лабораторії заводу «Красное Сормово» (м. Горький).

1942—1950 рр. Молодший, старший науковий співробітник, завідувач електротехнічного відділу Ін-

ституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Академії наук УРСР.

1943 р. Нагороджений орденом Трудового Червоного Прапора.

При своєму почеєному звання «Відмінник танкової промисловості СРСР».

1945 р. Захистив кандидатську дисертацію на тему «Аналіз роботи зварювальних головок і способів їхнього живлення при зварюванні під флюсом».

Нагороджений медаллю «За доблесну працю у Великій

- Вітчизняній війні 1941—1945 рр.».
- 1950 р. Присуджено Державну премію СРСР за розробку нового способу і створення автоматів та напівавтоматів шлангового зварювання.
- 1950—1953 рр. Заступник директора з наукової частини Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Академії наук УРСР.
- 1951 р. Обраний членом-кореспондентом Академії наук УРСР.
- 1952 р. Захистив докторську дисертацію на тему «Дослідження умов стійкого горіння зварювальної дуги та її регулювання».
- 1952—1991 рр. Член Комуністичної партії Радянського Союзу.
- 1953 р. Директор Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Академії наук УРСР (нині Національної академії наук України)*.
- Головний редактор журналу «Автоматичне зварювання»*.
- 1957 р. Присуджено Ленінську премію за створення і впровадження у важке машинобудування електрошлакового зварювання.
- 1957—1959 рр. Редактор серії «Бібліотека зварника» (Київ).
- 1958 р. Обраний дійсним членом (академіком) Академії наук УРСР.
- Присуджено Великий приз на Всесвітній виставці в Брюсселі за спосіб електрошлакового зварювання.
- 1958—1991 рр. Голова Ради з координації науково-дослідних робіт у галузі зварювання в СРСР.
- 1959—1988 рр. Депутат Верховної Ради Української РСР 5—11-го скликань.
- 1960—1962 рр. Член Державної науково-економічної ради при Раді Міністрів СРСР.
- 1960—1991 рр. Член Комітету, а з 1963 р. — член Президії Комітету з Ленінських і Державних премій у галузі науки і техніки при Раді Міністрів СРСР.
- 1961—1991 рр. Член ЦК КП України.
- 1961—1966 рр. Кандидат в члени ЦК КПРС.
- 1962 р. Обраний дійсним членом (академіком) Академії наук СРСР.
- 1962—1967 рр. Член комісії з закордонних справ Ради Союзу Верховної Ради СРСР.
- 1962 р. Президент Академії наук Української РСР (нині Національної академії наук України)*.
- 1962—1991 рр. Член Радянського комітету захисту миру. Член Ради з координації наукової діяльності академій наук союзних республік при Президії АН СРСР.
- 1962—1989 рр. Депутат Верховної Ради СРСР 6—11-го скликань.
- 1963 р. Делегат XIII з'їзду профспілок СРСР.
- 1963—1964 рр. Член Ради з науки при Раді Міністрів СРСР.
- 1963—1966 рр. Голова Наукової ради з проблемами «Дослідження і впровадження процесів зварювання в промисловість і будівництво» Державного комітету з координації науково-дослідних робіт при Раді Міністрів СРСР.
- 1963—1980 рр. Член Президії Верховної Ради Української РСР.
- 1963—1991 рр. Член Президії Академії наук СРСР.
- 1964—1991 рр. Голова Наукової ради з проблемами «Нові процеси одержання і обробки металічних матеріалів» при Президії АН СРСР.
- 1965—1991 рр. Член Державного комітету Ради Міністрів СРСР з науки і техніки.
- 1966 р. Нагороджений орденом Леніна.
- 1966—1989 рр. Заступник Голови Ради Союзу Верховної Ради СРСР.
- 1966—1991 рр. Член Вищої атестаційної комісії при Раді Міністрів СРСР.
- Член ЦК КПРС.
- Голова Наукової ради з проблемами «Нові процеси зварювання і зварні конструкції» Державного комітету СРСР з науки і техніки.
- 1967 р. Нагороджений золотою медаллю «За заслуги перед наукою» Словачької академії наук.
- 1968 р. Присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки Української РСР».
- Нагороджений орденом «За заслуги» Німецької Демократичної Республіки.
- Головний редактор журналу «Проблеми спеціальної електрометалургії» *.
- 1969 р. Обраний іноземним членом Болгарської академії наук. Присвоєно звання Героя Соціалістичної Праці з врученням ордена Леніна і золотої медалі «Серп і Молот».
- Голова Комітету з Державних премій Української РСР (з 1992 р. Комітет з Державних премій України в галузі науки і техніки)*.
- Головний редактор журналу «Вісник Академії наук Української РСР» (нині «Вісник Національної академії наук України»)*.
- 1970 р. Нагороджений ювілейною медаллю «За доблесну працю. На відзначення 100-річчя з дня народження Володимира Ілліча Леніна».
- 1971 р. Нагороджений золотою медаллю Лозанського університету (Швейцарія).
- Нагороджений золотою медаллю ім. Л. Лозана Асоціації металургів Італії.
- 1972 р. Науково-методичний керівник постійно діючого семінару-практикуму ЮНІДО з електрозварювання на базі Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона*.
- 1972—1991 рр. Голова Координаційного центру країн-членів РЕВ, які уклали угоду про співробітництво у галузі зварювальної науки і техніки, та головний редактор «Інформаційних матеріалів» Координаційного центру країн-членів РЕВ з проблемами «Розвиток наукових основ і розробка нових технологічних процесів зварювання, наплавлення і термічного різання різноманітних матеріалів і сплавів для отримання зварних конструкцій та створення ефективних зварювальних матеріалів і устаткування».
- 1973 р. Обраний іноземним членом Чехословацької

- академії наук.
- 1975 р. Обраний іноземним членом Академії наук і мистецтв Боснії та Герцеговини.
- Нагороджений орденом Леніна.
- Нагороджений ювілейною медаллю «Тридцять років перемоги у Великій Вітчизняній війні 1941—1945 рр.».
- 1975—1991 рр. Член пленуму Вищої атестаційної комісії при Раді Міністрів СРСР.
- 1976—1991 рр. Голова Національного комітету СРСР зі зварювання в Міжнародному інституті зварювання.
- 1977 р. Голова Республіканської ради з координації наукових досліджень у галузі природничих і суспільних наук УРСР.
- 1978 р. Нагороджений золотою медаллю «За заслуги перед наукою і людством» Чехословацької академії наук.
- Присвоєно звання Героя Соціалістичної Праці з врученнем ордена Леніна і другої золотої медалі «Серп і Молот».
- Нагороджений медаллю ім. С. І. Вавілова (АН СРСР).
- Почесний член Американського товариства зварників (США).
- Нагороджений медаллю ім. Джеймса Уатта Польської академії наук.
- Нагороджений Золотим знаком «Майстер Кольо Фічето» Профспілки працівників будіндустрії Болгарії.
- 1979 р. Нагороджений медаллю ім. Коперніка.
- 1980 р. Обраний іноземним членом Академії наук Німецької Демократичної Республіки.
- 1981 р. Нагороджений Почесною грамотою Президії Верховної Ради Української РСР.
- Нагороджений золотою медаллю ім. М. В. Ломоносова (АН СРСР).
- Нагороджений дипломом і знаком «Золотий Меркурій» за успіхи в розвитку міжнародної торгівлі.
- Почесний доктор Вищої технічної школи в м. Карл-Маркс-Штадт (нині м. Хемніц).
- 1982 р. Директор науково-технічного комплексу «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Академії наук Української РСР» *.
- Нагороджений медаллю «1300 років Болгарії» (НРБ).
- Нагороджений медаллю «В пам'ять 1500-річчя Києва».
- 1983 р. Присвоєно почесне звання «Заслужений винахідник СРСР».
- Нагороджений другою Почесною грамотою Президії Верховної Ради Української РСР.
- Нагороджений другою золотою медаллю «За заслуги перед наукою» Словачької академії наук.
- 1983—1991 рр. Голова Ради головних зварників СРСР.
- 1984 р. Нагороджений орденом Жовтневої Революції.
- Нагороджений золотою медаллю Союзу чехословацько-радянської дружби.
- Нагороджений медаллю «За заслуги в галузі технічних наук» Чехословацької академії наук.
- 1984—1991 рр. Член (з 1989 р. — Голова) Комітету з міжнародних Ленінських премій миру.
- 1985 р. Нагороджений орденом «Кирило і Мефодій» (Народна Республіка Болгарія).
- Нагороджений орденом «До 40-річчя звільнення Чехословаччини Радянською Армією».
- Нагороджений ювілейною медаллю «Сорок років перемоги у Великій Вітчизняній війні 1941—1945 рр.».
- 1985—1989 рр. Науковий керівник пріоритетного напряму «Нові матеріали і технології їхнього виробництва та обробки» комплексної програми науково-технічного прогресу країн-членів РЕВ до 2000 р.
- 1986 р. Генеральний директор Міжгалузевого науково-технічного комплексу «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона» Академії наук Української РСР*.
- Обраний іноземним членом Шведської Королівської Академії інженерних наук.
- 1987 р. Присвоєно звання «Почесний громадянин міста Києва».
- 1987—1988 рр. Голова радянської частини Координаційного комітету з нових матеріалів академій наук соціалістичних країн.
- 1988 р. Нагороджений другим Золотим знаком «Майстер Кольо Фічето» Профспілки працівників будіндустрії Болгарії.
- Нагороджений орденом Дружби Народів.
- Присвоєно почесне звання «Заслужений діяч газової промисловості СРСР».
- Нагороджений орденом «Дружба» (Чехословаччина).
- 1988—1991 рр. Член Ради сприяння науково-технічному прогресу при ЦК КП України.
- 1988—1992 рр. Голова Міжгалузевої наукової ради з проблем науково-технічного і соціально-економічного прогнозування при Президії АН УРСР і Держплані УРСР.
- 1989 р. Обраний почесним членом Римського клубу.
- Обраний почесним Президентом Української асоціації Римського клубу.
- Нагороджений знаком «Почесний залізничник СРСР».
- Головний редактор журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль» *.
- 1989—1991 рр. Народний депутат СРСР (від КПРС).
- 1990 р. Член комісії ЦК КПРС з науки, освіти та культури.
- Член науково-технічної ради Державної комісії Ради Міністрів СРСР з надзвичайних ситуацій.
- Почесний Президент Інженерної академії СРСР.
- 1990—1991 рр. Президент Радянської асоціації зовнішньоекономічного співробітництва в галузі перспективних матеріалів.
- 1991 р. Обраний членом і почесним Президентом Міжнародної інженерної академії (Росія).
- Голова Координаційної ради міждержавної російсько-української асоціації «Високонадійний трубопровідний транспорт» *.
- Голова міждержавної науково-технічної ради зі зварювання та споріднених технологій країн СНД*.
- 1992 р. Обраний членом Європейської Академії.
- Дійсний член (академік) Російської академії наук.
- Обраний почесним членом Академії технологічних наук Російської Федерації.

- 1992—1993 р. Член Колегії з питань науково-технічної політики Державної думи України.
- Член Комісії Президії Верховної Ради України з питань затвердження державних нагород України.
- 1992—1994 р. Член Ради Національної безпеки України.
- 1992—1996 рр. Голова міжвідомчої наукової ради з проблем науково-технічного та соціально-економічного прогнозування при Президії НАН України і Мінекономіки України.
- 1993 р. Президент Міжнародної асоціації академій наук*.
- Нагороджений Почесною відзнакою Президента України. Обраний почесним членом Британського інституту зварювання.
- Член Правління громадської міжнародної паливно-енергетичної асоціації*.
- 1994 р. Член Американського товариства інформації про матеріали*.
- Обраний почесним членом Індійської національної академії наук.
- Обраний почесним доктором Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка.
- Нагороджений золотою медаллю ім. В. Г. Шухова Спілки інженерних і науково-технічних товариств.
- Обраний іноземним членом Академії наук Вірменії.
- 1995 р. Член Державної комісії України з питань реорганізації в галузі науки*.
- Обраний Американським біографічним інститутом «Людиною року-95».
- Обраний іноземним членом Академії наук Казахстану.
- Обраний іноземним членом Академії наук Білорусі.
- 1996 р. Член Міждержавного комітету з науково-технічного розвитку країн-учасниць СНД*.
- Голова Наукової ради з нових матеріалів Міжнародної асоціації академій наук.
- Член оргкомітету II Міжнародного конгресу «Нові високі технології для нафтової промисловості та енергетики майбутнього», голова секції «Технології підвищення надійності трубопровідного транспорту, діагностика, аналіз і прогнозування аварій та ризиків» *.
- Вручено диплом дійсного члена (академіка) Міжнародної асоціації наук.
- Вручено диплом дійсного члена (академіка) Академії технологічних наук Російської Федерації.
- Член Головної ради Вищої атестаційної комісії України*. Член Ради з питань науки і науково-технічної політики при Президентові України*.
- Нагороджений Грамотою Німецького зварювального товариства.
- Обраний іноземним членом Академії наук Грузії.
- Нагороджений Почесним дипломом ім. академіка Є. О. Патона Національної академії прикладних наук Росії.
- Член Клубу російських членів Європейської Академії.
- Голова Комітету з системного аналізу при Президії НАН України*.
- Нагороджений Почесним орденом «За заслуги перед Італійською Республікою».
- 1997 р. Почесний член Міжнародної Академії наук, освіти, індустрії та мистецтва (США, Каліфорнія).
- Член Опікунської ради міжнародного фонду ядерної безпеки (Віденсь).
- Нагороджений Відзнакою Президента України «Орден князя Ярослава Мудрого» 5-го ступеня.
- Член Ради національної безпеки і оборони України*.
- Обраний почесним членом Німецького зварювального товариства.
- Обраний почесним членом Міжнародної академії астронавтики (США).
- Нагороджений медаллю Жукова (до 100-річчя з дня народження маршала Радянського Союзу Г.К. Жукова).
- Голова Ради з координації фундаментальних досліджень в Україні*.
- Голова консультивативної ради незалежних експертів з комплексного вирішення проблем, пов'язаних з Чорнобильською АЕС, при Президентові України*.
- Вручено посвідчення «Ветеран Великої Вітчизняної війни».
- Член редакційної колегії журналу «Потенциал» (Російська Федерація).
- Обраний Почесним академіком (почесним членом) Національної академії прикладних наук Росії.
- Нагороджений Нагородною стрічкою Національної академії прикладних наук Росії.
- Обраний Почесним Президентом Міжнародної академії організаційних і управлінських наук (м. Мінськ).
- 1998 р. Нагороджений дипломом Почесної відзнакої Союзу польських інженерів-механіків.
- Нагороджений золотою медаллю Всесвітньої організації інтелектуальної власності (Женева).
- Співголова Ради директорів Асоціації «Високонадійний трубопровідний транспорт».
- Нагороджений відзнакою Президента України «Герой України» з врученнем ордена Держави.
- Присвоєно звання «Почесний доктор Національного технічного університету України «КПІ».
- Присвоєно учене звання професора.
- Присвоєно звання «Почесний доктор Харківського державного політехнічного університету».
- Присвоєно звання «Почесний доктор Санкт-Петербурзького державного технічного університету».
- Нагороджений нагрудним знаком «За досягнення» Міністерства України у справах науки і технологій.
- Призначений членом Координаційної ради з питань внутрішньої політики при Президентові України.
- Присвоєно звання «Почесний громадянин м. Маріуполя».
- Присвоєно звання «Почесний монтажник» корпорації «Монтажспецстрой» (Росія).
- Нагороджений Великою срібною медаллю «За видатні досягнення в інженерній діяльності» Міжнародної інженерної академії (Росія).
- Нагороджений Почесним знаком ЗАТ «Стройтрансгаз» (Росія).
- Нагороджений відомчим знаком «Почесний будівельник Росії».

Нагороджений орденом «За заслуги перед Вітчизною» 2-го ступеня (Росія).

Нагороджений пам'ятною медаллю «50 років Перемоги над нацистською Німеччиною» Організації воянів, партизанів та інвалідів війни з нацизмом Ізраїлю.

Нагороджений орденом Миколи Чудотворця Фонду Міжнародних премій ім. академіка М. А. Касьяна.

1999 р. Нагороджений медаллю «За зміцнення бойової співдружності» Міністерства оборони Росії.

Попечитель міжнародної неурядової організації «Фонд 200-річчя О. С. Пушкіна» (Росія).

За великий внесок у здійснення програми підтримки вітчизняної культури вручено пам'ятну срібну Пушкінську медаль з занесенням в Почесний реєстр попечителів (Росія).

Нагороджений Почесною відзнакою Міжнародного інституту менеджменту (МІМ-Київ).

Нагороджений знаком і зіркою лауреата премії Андрія Первозванного Фонду Всехвального апостола Андрія Первозванного (Росія).

Нагороджений орденом Святого Князя Володимира Української Православної Церкви (Московський Патріархат).

Нагороджений срібною статуєю богині Фортуни з золотим мечем Всеукраїнського відкритого Рейтингу популярності та якості товарів і послуг «Золота Фортuna».

Нагороджений Почесною нагородою Всеукраїнського Єврейського Конгресу (ВСК).

Присвоєно звання «Почесний громадянин м. Славутич». 2000 р. Голова Президії Рейтингу популярності та якості товарів і послуг «Золота Фортuna»*.

Нагороджений «Кавалерським знаком Ордена Наука, Освіта, Культура» Всесвітнім інформаційно-розподільчим університетом.

Присуджено Почесний диплом «Лідер громадського руху «Енергетику ХХІ століття — на шлях стійкого розвитку» Міжнародної паливно-енергетичної асоціації.

Присуджено Премію ім. В. Вернадського Фонду інтелектуального співробітництва «Україна — ХХІ століття».

Нагороджений Великим Хрестом Ордена Святого Станіслава 1-го ступеня.

Почесний член опікунської Ради фонду «Духовне єднання»*.

Член Комісії зі встановлення пенсій за особливі заслуги перед Україною при Кабінеті міністрів України*.

Нагороджений дипломом і пам'ятною медаллю Національного проекту «Золота книга ділової еліти України».

Присвоєно звання «Заслужений інженер Росії» Президією Російської інженерної академії з врученням золотого знаку РІА № 001.

2001 р. Нагороджений Орденом Христа Спасителя за заслуги перед помістною Українською Православною Церквою (Київський Патріархат).

Голова Міжвідомчої ради з координації фундаментальних досліджень при НАН України відповідно до постанови Кабінету міністрів України*.

Обраний іноземним членом (академіком) Академії наук Республіки Таджикистан.

Присвоєно звання «Почесного доктора Таджицького державного національного університету».

Нагороджений золотою Георгієвською медаллю «Честь, Слава, Труд» 1-го ступеня з присвоєнням титулу «Георгієвський офіцер» Міжнародного відкритого Рейтингу популярності та якості «Золота Фортуна».

Присвоєно звання «Почесний доктор наук Інституту механіки металополімерних систем ім. В. А. Білого Національної академії наук Білорусі».

Нагороджений орденом «Святий Георгій Победоносець з золотими мечами» 4-го ступеня Міжнародного відкритого академічного Рейтингу «Золота Фортуна».

Присвоєно звання «Почесний доктор Національного авіаційного університету», Київ, Україна.

2002 р. Нагороджений орденом «За заслуги перед козацтвом» Союзу козацьких організацій України.

Нагороджений Почесною грамотою Кабінету Міністрів України.

Удостоєний міжнародної нагороди «Віденський кубок» в номінації «Керівник ХХІ століття» Організаційним комітетом проекту «Європейський союз-ХХІ століття».

Прийнятий до лав Українського реєстрового козацтва. Президент Ради президентів національних академій наук держав-членів Організації Чорноморського економічного співробітництва (ОЧЕС)*.

2003 р. Указом Президента Республіки Саха (Якутія) присвоєно ім'я «Академік Б. Є. Патон» алмазу вагою 51.98 карата, видобутому на родовищі «Удачна».

* До цього часу.

НАШІ АВТОРИ

АГАРКОВ Анатолій Васильович — заступник Генерального конструктора Державного конструкторського бюро «Південне».

Напрям науки — космічні дослідження.

АЛЕКСЕНКО Євген Миколайович — провідний інженер-конструктор відділу прикладного кріогенного і космічного матеріалознавства Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України.

Напрям науки — кріогенно-вакуумне та космічне матеріалознавство.

АНТОНОВ Олександр Васильович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту НАН України (Харків), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

АНФІМОВ Н. А. — генеральний директор Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Росавіакосмосу (м. Корольов, Росія), академік РАН.

Напрям науки — теплофізика і масоперенесення, системні дослідження в галузі РКТ.

АРХАНГЕЛЬСЬКА Ірина Володимирівна — молодший науковий співробітник Інституту астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету), Росія.

Напрям науки — гамма-спалахи, фізика Сонця, сонячно-земні зв'язки, методи аналізу результатів експериментів, фрактальний аналіз.

АРХАНГЕЛЬСЬКИЙ Андрій Ігоревич — науковий співробітник Інституту астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету), Росія.

Напрям науки — фізика Сонця, математичне моделювання взаємодії випромінювання з речовиною, космічне наукове приладобудування.

АСНІС Юхим Аркадійович — провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, доктор технічних наук.

Напрям науки — космічні технології.

БАБІЧ Вілік Максимович — завідувач відділу Інституту фізики напівпровідників НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика напівпровідників і напівпровідникове матеріалознавство.

БАННИКОВА Олена Юріївна — молодший науковий співробітник Інституту астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна.

Напрям науки — позагалактичні джерела випромінювання, фізичні процеси в центрах активних галактик.

БАРАНСЬКИЙ Петро Іванович — головний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика напівпровідників і напівпровідникове матеріалознавство.



БЕЗРОДНИЙ Володимир Григорович — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного Інституту НАН України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — статистична теорія дифракції, космічна радіофізика.

БЕКМУРАТОВ Тулкун Файзійович — провідний науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Алгоритм-Інжинірінг» Академії наук Республіки Узбекистан, член-кореспондент АН Республіки Узбекистан, заступник генерального директора НПО «Кібернетика», куратор НІР НДІ «Алгоритм» НПО «Кібернетика», член Президії, заступник Голови відділення механіки та інформатики АН Узбекистану, завідувач лабораторії НПО «Кібернетика» АН Узбекистану, доктор технічних наук

Напрям науки — моделювання, прийняття рішень в умовах невизначеності, експертні системи; моделі та методи обробки стохастичних сигналів.

БЕРСУДСЬКИЙ Євген Йосипович — старший інженер Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Напрям науки — космічне приладобудування.

БІДЮК Петро Іванович — професор Інституту прикладного системного аналізу НАН та Міністерства освіти і науки України у складі Національного технічного університету України «Київський політехнічний університет», доктор технічних наук. Член наукових спілок Sigma Xi, HFES, ACES.

Напрям науки — прикладна теорія оцінювання, математичного моделювання і прогнозування на основі часових рядів.

БОЙКО Анатолій Леонідович — завідувач кафедри вірусології біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, академік Української академії аграрних наук, лауреат премії академіка Д. К. Заболотного, доктор біологічних наук, професор.

Напрям науки — екологія, структура і функції вірусів.

БОЙКО В'ячеслав — старший науковий співробітник відділу прикладних досліджень Інституту математики НАН України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — симетрійний аналіз диференціальних рівнянь та його застосування, точні розв'язки диференціальних рівнянь, зображення алгебр Лі.

БОЙНТОН У. В. — співробітник Аризонського університету, Місячно-планетна лабораторія, США, Туксон. Керівник експерименту GRS (гамма-спектрометр) на борту американської міжпланетної місії «2001 Mars Odyssey».

Напрям науки — гамма-астрономія, вивчення планет Сонячної системи.

БОЛДИРЄВ Сергій Іванович — старший науковий співробітник Інституту астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету).

Напрям науки — астрофізика, фізика Сонця.

БРОНОВЕЦЬ Марат Олександрович — заступник голови Міжвідомчої наукової ради з трибології при РАН, Мінпромнауки Росії і Спілці НДО (Москва), доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем механіки РАН.

Напрям науки — трибологія, в т. ч. матеріалів для вузлів тертя космічних апаратів.

БУДАНОВ Олег Валентинович — молодший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту НАН України, учасник 6-ї Української антарктичної експедиції.

Напрям науки — експериментальні радіофізичні дослідження, чисельне моделювання.

БУДЗИНОВСЬКА Інна Анатоліївна — молодший науковий співробітник НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти та науки України.

Напрям науки — фізика Сонця, обробка спостережних даних.

БУШУЄВ Євген Іванович — заступник директора Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук.

Напрям науки — системне проектування космічних систем спостереження Землі. Обробка даних ДЗЗ.

ВЛАСЕНКО Володимир Петрович — інженер Центру приймання наукової інформації Національного центру керування та випробувань космічних засобів Національного космічного агентства України.

Напрям науки — радіотехнічні системи, радіоастрономія.

ВОЛОШИН В'ячеслав Іванович — директор Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрям науки — розробка апаратно-програмних засобів для планування роботи і оперативного керування космічною системою, обробка даних ДЗЗ.

ГАВРИЛОВ Роланд Володимирович — директор СКТБ з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — кріогенно-космічні технології.

ГАМУЛЯ Гарій Дмитрович — головний конструктор проекту, начальник сектору СКТБ Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України.

Напрям науки — триботехнічні дослідження матеріалів.

ГЕЛЬФРЕЙХ Георгій Борисович — провідний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії РАН, доктор фізики-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика Сонця і радіоастрономія.

ГЕРАСИМОВ Юрій Михайлович — головний інженер Радіоастрономічного інституту НАН України (Харків).

Напрям науки — радіоастрономія.

ГОЛЬДВАРГ Тетяна Борисівна — аспірантка Калмицького державного університету.

Напрям науки — фізика Сонця, обробка спостережних даних.

ГОПАСЮК Ольга Степанівна — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», кандидат фізики-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця.

ГОПАСЮК Степан Ілліч — головний науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», доктор фізики-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця.

ГОТИНЯН Олег Євгенович — аспірант КНУ.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

ГРИНЬКОВ Володимир Юрійович — аспірант Інституту космічних досліджень РАН, Москва.

Напрям науки — вивчення сонячних спалахів, гамма-астрономія.

ЕЙСМОНТ Натан А. — Інститут космічних досліджень Радійської академії наук (Москва).

ЄГОРОВА О. І. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

ЄЛАНСЬКИЙ Юрій Анатолійович — заступник начальника відділу Державного конструкторського бюро «Південне».

Напрям науки — розробка конструкцій датчиків, приладів та систем для ракетно-космічних апаратів.

ЖИВИЛО Світлана Дмитрівна — науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ.

Напрям науки — дослідження надпровідників динамічних систем із застосуванням математичного моделювання і сучасних кібернетических методів.

ЖИВОЛУБ Євген Леонідович — науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г. В. Курдомова НАН України, кандидат фізики-математичних наук.

Напрям науки — матеріалознавство.

ЗАБОЛЮТИН Станіслав Павлович — старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічні технології.

ЗАВГОРОДНИЙ Леонід Терентійович — начальник групи Державного конструкторського бюро «Південне».

Напрям науки — розробка конструкцій датчиків, приладів та систем для ракетно-космічних апаратів.



ЗАЛІОБОВСЬКИЙ Ілля Іванович — проректор з наукової роботи Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, завідувач кафедри експериментальної ядерної фізики, член-кореспондент НАНУ, доктор фізики-математичних наук, професор. Лауреат Державної премії України 1971 і 1999 рр., лауреат премії ім. К. Д. Синельникова, лауреат премії ім. Ярослава Мудрого, Заслужений діяч науки і техніки України, кавалер орденів Трудового Червоної Прапора (1976 і 1986 рр.), «За заслуги» III ступеня (1998 р.), «Відмінник освіти України».

Напрям науки — експериментальна ядерна фізика, фізика космічних променів, радіаційна фізика.

ЗАСТЕНКЕР Георгій Н. — Інститут космічних досліджень Російської академії наук (Москва), кандидат фізико-математичних наук.



ЗАЯЦЬ Світлана Вікторівна — головний спеціаліст відділу космічних досліджень Національного космічного агентства України.

Напрям науки — економіка та управління науково-технічним прогресом, аерокосмічні дистанційні методи.

ЗЕЛЕНИЙ Лев М. — директор Інституту космічних досліджень Російської академії наук (Москва), член-кореспондент РАН, професор.



ЗУБКО Віктор Петрович — начальник відділу космічних досліджень Національного космічного агентства України.

Напрям науки — аерокосмічні дистанційні методи, геоінформаційні системи.

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету КНУ, професор.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.



ІСМАЙЛ Хасанхан Мірзакаланович — старший науковий співробітник НДІ «Алгоритм-Інжиніринг» Академії наук Республіки Узбекистан, головний конструктор НДІ «Алгоритм» НПО «Кібернетика» АН Узбекистану, кандидат технічних наук.

Напрям науки — моделювання динамічних систем і систем адаптивної обробки гравітаційних і сейсмічних сигналів; розробка цифрових методів та систем збирання та обробки інформації.



КАРТАШОВ Віктор Митрофанович — старший науковий співробітник кафедри експериментальної ядерної фізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — експериментальна ядерна фізика, фізика космічних променів, радиаційна фізика.



КЛИМЕНКО Юрій Олександрович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень НАН України та НКАУ України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика твердого стану, теоретична фізика.



КОВТУН Володимир Євгенович — старший науковий співробітник кафедри експериментальної ядерної фізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна.

Напрям науки — фізика високих енергій, фізика космічних променів, методи ядерно-фізичного експерименту.

КОЗИРЕВ Олександр Сергійович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень РАН, Москва.

Напрям науки — астрофізика високих енергій, статистичний аналіз експериментальних даних.

КОЗОРІЗ Василь Васильович — завідувач кафедри вищої математики Київської державної академії водного транспорту, член Міжнародного товариства мобільності на морі, в повітрі та в космосі (США), доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — дослідження надпровідних динамічних систем із застосуванням математичного та фізичного моделювання і сучасних кібернетических методів, кріогенне навігаційне приладобудування.

КОЗОРІЗ Олександр Васильович — аспірант Університету м. Толедо, США.

Напрям науки — комп'ютерні науки та електрика, магнітна левітація.

КОЛОДЯЖНИЙ Олександр Анатолійович — виконувач обов'язків завідувача відділу, старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — інформаційні системи управління навколошнім середовищем, дистанційне зондування Землі.



КОЛОСКОВ Олександр Валерійович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного Інституту НАН України, кандидат фізико-математичних наук, учасник 7-ї Української антарктичної експедиції.

Напрям науки — радіофізичні дослідження навколоземного простору.



КОНТОРОВИЧ Віктор Мусійович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту НАН України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — теоретична фізика, астрофізика.

КОПИЛОВА Юлія Геннадіївна — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії РАН, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми.

КОТОВ Юрій Дмитрович — директор Інституту астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету).

Напрям науки — експериментальна астрофізика, фізика космічних променів, фізика Сонця, детектування ядерних випромінювань.

КОЧУБЕЙ Світлана Михайлівна — провідний науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики НАН України, доктор біологічних наук, професор.

Напрям науки — фізіологія рослин.

КРИВОДУБСЬКИЙ Валерій Никифорович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і сонячна магнітогідродинаміка.

КУДАШОВ Юхим Борисович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень РАН.

Напрям науки — дистанційне зондування Землі з космосу, геоінформатика, інформаційні системи; геоекологія і природокористування.

КУЗНЕЦОВ А. А. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

КУНЦЕВИЧ Всеволод Михайлович — директор Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України, академік НАН України.

Напрям науки — системи керування.

КЮНЕ Томас — директор Федерального центру розведення та досліджень культурних рослин, Інститут захисту рослин і діагностики фітопатогенів (м. Ашерслебен, Німеччина), професор.

Напрям науки — молекулярні механізми стійкості рослин до фітовірусів.

ЛАДІКОВ-РОСВ Юрій Павлович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень НАНУ і НКАУ, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — гідродинаміка, магнітна гідродинаміка, системний аналіз.

ЛІТВАК Максим Леонідович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень РАН, Москва, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрофізика високих енергій, вивчення планет Сонячної системи, статистичний аналіз експериментальних даних, числове моделювання.

ЛОКТЕВА Н. І. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

ЛОТОЦЬКА Вікторія Олександрівна, начальник сектору відділу прикладного кріогенного і космічного матеріалознавства Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — кріогенно-вакуумне та космічне матеріалознавство.

ЛУК'ЯЩЕНКО В. І. — заступник генерального директора центрального науково-дослідного інституту машинобудування Розавіакосмосу (м. Корольов, Росія), доктор технічних наук.

Напрям науки — системні дослідження в галузі РКТ, розробка програм досліджень.



ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор 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 — гідрогеологія, дистанційне зондування земної поверхні.

МАКАРЕНКО Валерія Володимирівна — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — прикладна математика, географічні інформаційні системи, дистанційне зондування Землі.



ПАТОН Борис Євгенович — Президент Національної академії наук України, директор Інституту електрозварювання ім. Е. О. Патона Національної академії наук України, академік.

Напрям науки — електрозварювання.

ПЕТРОЧЕНКО Олександр Юрійович — програміст Українського центру менеджменту землі та ресурсів.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, автоматизована інтерпретація даних дистанційного зондування.

ПЕТРУКОВИЧ Анатолій А. — Інститут космічних досліджень Російської академії наук (Москва).

ПЕТРУШКЕВИЧ І. Б. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

ПЛІШКО Нінель — провідний інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз та теорія оптимальних рішень, космічна сенсорика.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України з наукової роботи, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, автоматизована інтерпретація даних дистанційного зондування.

ПОХИЛ Юрій Онисимович — заступник директора СКТБ з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, начальник відділу прикладного кріогенного і космічного матеріалознавства, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — кріогенно-вакуумне та космічне матеріалознавство.

РАБОЧИЙ Петро Петрович — студент Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут».

Напрям науки — гідродинаміка, чисельне моделювання.

РАПОПОРТ Юрій Григорович — докторант фізичного факультету КНУ, старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.



РОЗУМЕНКО Віктор Тимофійович — доцент кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Заслужений викладач Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — радіофізичні методи дослідження навколоземної плазми, експериментальне дослідження та моделювання, антропогенні збурення.

РЯБОКОНЕНКО Олександр Давидович — технічний директор Українського центру менеджменту землі та ресурсів.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

САЛЬНИКОВ Микола Миколайович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — гідродинаміка, системний аналіз.

САНІН Антон Борисович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень РАН (Москва), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — гамма-астрономія, вивчення планет Сонячної системи, статистичний аналіз даних.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геологомінералогічних наук.

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

СЕЛІВАНОВ Юрій Олександрович — завідувач лабораторії Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — теоретична фізика, обчислювальна фізика.

СИНЕЛЬЩИКОВ М. В. — начальник Управління Росавіакосмосу (Росія).

Напрям науки — оптимізація та оцінка ефективності федеральних пілотованих програм.

СКОРОХОД Валерій Володимирович — директор Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, академік НАН України.

Напрям науки — розробки у галузі матеріалів з елементами самоорганізації.

СОЛНЦЕВ Віктор Петрович — провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — розробки у галузі матеріалів з елементами самоорганізації.



ПАТОН Борис Євгенович — Президент Національної академії наук України, директор Інституту електрозварювання ім. Е. О. Патона Національної академії наук України, академік.

Напрям науки — електрозварювання.

ПЕТРОЧЕНКО Олександр Юрійович — програміст Українського центру менеджменту землі та ресурсів.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, автоматизована інтерпретація даних дистанційного зондування.

ПЕТРУКОВИЧ Анатолій А. — Інститут космічних досліджень Російської академії наук (Москва).

ПЕТРУШКЕВИЧ І. Б. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

ПЛІШКО Нінель — провідний інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз та теорія оптимальних рішень, космічна сенсорика.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України з наукової роботи, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, автоматизована інтерпретація даних дистанційного зондування.

ПОХИЛ Юрій Онисимович — заступник директора СКТБ з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, начальник відділу прикладного кріогенного і космічного матеріалознавства, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — кріогенно-вакуумне та космічне матеріалознавство.

РАБОЧИЙ Петро Петрович — студент Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут».

Напрям науки — гідродинаміка, чисельне моделювання.

РАПОПОРТ Юрій Григорович — докторант фізичного факультету КНУ, старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.



РОЗУМЕНКО Віктор Тимофійович — доцент кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Заслужений викладач Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — радіофізичні методи дослідження навколоземної плазми, експериментальне дослідження та моделювання, антропогенні збурення.

РЯБОКОНЕНКО Олександр Давидович — технічний директор Українського центру менеджменту землі та ресурсів.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

САЛЬНИКОВ Микола Миколайович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — гідродинаміка, системний аналіз.

САНІН Антон Борисович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень РАН (Москва), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — гамма-астрономія, вивчення планет Сонячної системи, статистичний аналіз даних.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геологомінералогічних наук.

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

СЕЛІВАНОВ Юрій Олександрович — завідувач лабораторії Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — теоретична фізика, обчислювальна фізика.

СИНЕЛЬЩИКОВ М. В. — начальник Управління Росавіакосмосу (Росія).

Напрям науки — оптимізація та оцінка ефективності федеральних пілотованих програм.

СКОРОХОД Валерій Володимирович — директор Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, академік НАН України.

Напрям науки — розробки у галузі матеріалів з елементами самоорганізації.

СОЛНЦЕВ Віктор Петрович — провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — розробки у галузі матеріалів з елементами самоорганізації.

СОРОКІН І. В. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

СОРОКІН Олександр Федорович — інженер Центру приймання наукової інформації Національного центру керування та випробувань космічних засобів Національного космічного агентства України, доцент, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика плазми, астрофізика.



ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика іоносфери.

СТЕПАНОВ Олександр Володимирович — директор Головної астрономічної обсерваторії РАН, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми, радіоастрономія.

СУВОРОВ В. В. — заступник начальника НТЦ Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Росавіакосмосу (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — розробка програм дослідження, системне проектування ПКК.

СУРДУ Михайло Миколайович — заступник директора Державного науково-виробничого підприємства «Спецавтоматика», доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — автоматика та вимірювальна техніка.

ТАМКОВИЧ Г. М. — Інститут космічних досліджень Російської академії наук (Москва).



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

Напрям науки — іоносферні збурення, моделювання та передбачення процесів, вплив сонячних та магнітних збурень на здоров'я людей.

ТИХІЙ Віктор Григорович — начальник відділу Державного конструкторського бюро «Південне», кандидат технічних наук.

Напрям науки — дослідження характеристик матеріалів і методи неруйнівного контролю.

ТРЕТЬЯКОВ Владислав Іванович — конструктор І категорії Інституту космічних досліджень РАН, Москва.

Напрям науки — експериментальні методи обробки, числове моделювання результатів експерименту.

УШАКОВА Т. А. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.

ФЕДОРОВ Олег Павлович — начальник управління космічних програм наукових досліджень НКА України, завідувач лабораторії Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — матеріалознавство.

ФЕДЯКІН Олександр Іванович — завідувач відділу ефективності технічних систем Інституту технічної механіки НАНУ—НКАУ, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — дослідження технічної і економічної ефективності складних систем.

ФРОЛОВ Геннадій Олександрович — завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, керівник науково-технічного центру «Ракетно-космічне матеріалознавство», доктор технічних наук. Відповідальний виконавець robіt в ІПМ НАН України з підготовки експериментів на борту МКС.

Напрям науки — дослідження матеріалів для ракетно-космічної техніки, високотемпературна теплофізика.

ХАРЕЧКО Ольга Георгіївна — помічник з виконання проектів Українського центру менеджменту землі та ресурсів.

Напрям науки — прогнозування екологічного стану геосистем з використанням даних дистанційного зондування.

ЦАП Юрій Теодорович — старший науковий співробітник НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти та науки України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми, радіоастрономія.

ЦВЄТКОВ Лев Іванович — провідний науковий співробітник НДІ Кримська астрофізична обсерваторія Міністерства освіти та науки України, завідувач лабораторії радіоастрономії, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і радіоастрономія.

ЦИМБАЛЮК М. М. — начальник лабораторії Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Росавіакосмосу (м. Корольов, Росія), кандидат технічних наук.

Напрям науки — машинобудування.

ЦЮХ Олександр Михайлович — інженер Центру приймання наукової інформації Національного центру керування та випробувань космічних засобів Національного космічного агентства України.

Напрям науки — радіотехнічні системи, радіоастрономія.

ЧАРИШНИКОВ Сергій Валерійович — студент Московського інженерно-фізичного інституту (Росія, Москва).

Напрям науки — гамма-спектроскопія поверхні планет.



ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор фізики-математичних наук.

Напрям науки — фізика плазми, теоретична фізика.

ЧЕСАЛИН Лев С. — завідувач відділу Інституту космічних досліджень Російської академії наук (Москва), кандидат фізики-математичних наук.

ЧИСТЯКОВ Павло Юрійович — інженер ТОВ «СКІНЕР», Москва, Росія.

Напрям науки — розробка електронного устаткування спеціального призначення.



ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України, доктор фізики-математичних наук, професор, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — космічна фізика, космічна радіофізика, космічна екологія та космічна погода.

ШАМАНІНА Г. А. — РКК «Енергія» ім. С. П. Корольова, м. Корольов Московської області, Росія.



ШМАТКО Євген Степанович — доцент кафедри експериментальної ядерної фізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, заступник завідувача кафедри експериментальної ядерної фізики, кандидат фізики-математичних наук, лауреат Державної премії України 1971 р.

Напрям науки — експериментальна ядерна фізика, фізика космічних променів, радиаційна фізика.

ШПАК Анатолій Петрович — директор Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, доктор фізики-математичних наук, академік НАН України, професор.

Напрям науки — матеріалознавство.

ШУЛЕШОВА Ольга Володимирівна — інженер Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України.

Напрям науки — фізика металів.

ЮРОВ Віталій Миколайович — заступник директора Інституту астрофізики Московського інженерно-фізичного інституту (Державного університету).

Напрям науки — астрофізика, детектори частинок.

ЮРОВСЬКИЙ Юрій Ф. — співробітник НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти та науки України.

Напрям науки — фізика Сонця і космічної плазми, радіоастрономія.

ЯКОВЕНКО Леонід Федорович — начальник сектору відділу прикладного кріогенного і космічного матеріалознавства Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Напрям науки — кріогенно-вакуумне та космічне матеріалознавство.



ЯМПОЛЬСЬКИЙ Юрій Мусійович — завідувач відділу іоносферного поширення радіовильду Радіоастрономічного Інституту НАН України, доктор фізики-математичних наук, професор, заслужений діяч науки та техніки України, керівник наукового напрямку «Фізика верхньої атмосфери та близького космосу» Української державної програми досліджень в Антарктиці.

Напрям науки — космічна радіофізика.



ЯЦЕНКО Віталій Олексійович — провідний науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, член Вченої Ради наукового фонду вчених та спеціалістів з молекулярної кібернетики та інформатики та член Вченої Ради з присудження наукових ступенів, доктор технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз та теорія оптимальних рішень, космічна сенсорика.

ЯЦЕНКО Леонід Петрович — провідний науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук України, доктор фізики-математичних наук, професор.

Напрям науки — оптика та лазерна фізика, спектроскопія, метрологія.