

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 17  
1 + 2011

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

## МАТЕРІАЛИ

Десятої Української конференції  
з космічних досліджень  
30 серпня — 3 вересня 2010 р.

## ЗМІСТ

- Федоров О. П., Колос Л. Н.* Космическая деятельность Украины: подходы к созданию стратегии 3
- Кузнецов В. Д., Ружин Ю. Я., Синельников В. М.* Геофизические эксперименты на МКС 12
- Мирошниченко Л. И.* Проблема «Солнце — Земля»: современные концепции и физические механизмы 17
- Криводубский В. Н., Черемных О. К.* О затянувшемся во времени 23-м солнечном цикле 23
- Логинов А. А., Сальников Н. Н., Черемных О. К., Криводубский В. Н., Маслова Н. В.* Гидродинамическая модель генерации глобального полоидального течения Солнца 29
- Парновский А. С., Полонская А. Ю., Шевченко В. Н., Жук И. Т., Маслова Н. В.* Регрессионное моделирование индексов  $a_p$  и  $K_p$ : Первые результаты 36
- Сумарук Ю. П.* Залежність величини варіацій геомагнітного поля від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи 39
- Лизунов Г. В., Леонтьев А. Ю.* Приближенное дисперсионное уравнение для атмосферных гравитационных волн 43

## CONTENTS

- Fedorov O. P., Kolos L. N.* Ukrainian space activity: some approaches to the strategy development 3
- Kuznetsov V. D., Ruzhin Yu. Ya., Sinelnikov V. M.* Geophysical experiments aboard the ISS 12
- Miroshnichenko L. I.* The Sun — Earth problem: Modern concepts and physical mechanisms 17
- Krivodubskij V. N., Cheremnykh O. K.* On the extended 23rd solar cycle 23
- Loginov A. A., Salnikov N. N., Cheremnykh O. K., Krivodubskij V. N., Maslova N. V.* Hydrodynamic model for generation of global poloidal flow of the Sun 29
- Parnowski A. S., Polonskaya A. Yu., Shevchenko V. N., Zhuk I. T., Maslova N. V.* Regression modelling for  $a_p$  and  $K_p$  indices: First results 36
- Sumaruk Yu. P.* Dependence of geomagnetic field variations on the initial state of the magnetosphere-ionosphere system 39
- Lizunov G. V., Leontiev A. Yu.* An approximate dispersion equation for atmosphere gravity waves 43

- Антонов А. В., Герасимов Ю. М.* Оценка влияния солнечных вспышек на тропосферу Земли **47** *Antonov A. V., Gerasimov Yu. M.* Estimation of the influence of solar flares on the Earth's troposphere
- Шаврина А. В., Микульская И. А., Кифоренко С. И., Шеминова В. А., Велес А. А., Блум О. Б.* Исследование озона в приземном слое атмосферы Киева и его влияния на здоровье населения **52** *Shavrina A. V., Mikulskaya I. A., Kiforenko S. I., Shemino-va V. A., Veles A. A., Blum O. B.* The study of ground-level ozone over Kyiv and its impact on public health
- Зельк Я. И., Куссуль Н. Н., Скакун С. В., Шелестов А. Ю.* Оценка рисков стихийных бедствий на основе ансамблевой обработки и технологии слияния разнородных геопространственных данных **60** *Zyelyk Ya. I., Kussul N. M., Skakun S. V., Shelestov A. Yu.* Natural disaster risk assessment based on the ensemble processing and technology of heterogeneous geospatial data fusion
- Беляев Ю. В., Крот Ю. А., Катковский Л. В., Роговец А. В., Хвалец С. В.* Организация и использование белорусского подспутникового полигона для полетных калибровок оптических систем космических аппаратов **65** *Belyaev Yu. V., Krot Yu. A., Katkovsky L. V., Rogovets A. V., Khvalei S. V.* Initiation and application of Belarusian sub-satellite test site for in-flight calibration of space optical systems
- Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г.* RT-22 КраО: подготовка научной программы и проведение тестовых наземных РСДБ-экспериментов в рамках проекта «РадиоАстрон» **70** *Volvach A. E., Kardashev N. S., Larionov M. G.* The RT-22 of the CRAO: Scientific program elaboration and performance of ground-based VLBI test experiments within the framework of the project «RadioAstron»
- Голубничий П. И., Решетняк Д. В., Филоненко А. Д., Хорощун А. Н.* О природе короткопериодических вариаций радиопотока от Луны в сантиметровом диапазоне длин волн **76** *Golubnichiy P. I., Reshetnyak D. V., Filonenko A. D., Khoroshun A. N.* On the nature of short-period variations of the lunar radio emission in the centimetric wave range
- Беляев Ю. В., Катковский Л. В., Крот Ю. А., Хвалец С. В., Хомищевич А. Д.* Исследование и оптимизация угловых характеристик фотоспектральной системы **80** *Belyaev Yu. V., Katkovsky L.V., Krot Ya. A., Khvalei S. V., Khomeitsevich A. D.* Analysis and optimization of photospectral system angular characteristics
- Набивач В. Е., Опанасенко В. Н., Семенов О. В., Яценко В. А.* Алгоритм определения ориентации космического аппарата с помощью звездного датчика **84** *Nabivach V. E. Opanasenko, V. N., Semenov O. V., Yatsenko V. O.* An algorithm of determination for spacecraft orientation with the use of a star sensor
- НАШИ АВТОРИ** **90** **OUR AUTHORS**

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 01.03.11. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.  
Ум. друк. арк. 9,66. Обл.-вид. арк. 10,14. Тираж 100 прим. Зам. № 2908.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України,  
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

УДК 65.012

**О. П. Федоров, Л. Н. Колос**

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

## **КОСМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ УКРАИНЫ: ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ СТРАТЕГИИ**

---

*Пропонуються підходи до розробки наукових основ формування стратегії космічної діяльності України з використанням ідеології стратегічного управління. Розглядаються деякі принципові особливості сучасної космонавтики, які необхідно враховувати при формуванні стратегії космічної діяльності України. Пропонується схема структурування космічної діяльності, процедура визначення характеристичних параметрів кожного із напрямків та їхнього оцінювання.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ.**

#### **МОТИВАЦИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Современная украинская космонавтика представляет несомненный интерес с точки зрения анализа ее состояния и особенно как объекта управления. Даже поверхностный анализ свидетельствует о резком отличии реального состояния дел (реализации проектов, развития новых средств и инноваций, бюджетного финансирования) и положений программных документов. Действующая национальная космическая программа [3] содержит практически все разделы, характеризующие динамически развивающуюся космическую отрасль, в то же время фактический уровень государственной поддержки недвусмысленно указывают на реальное сворачивание космической деятельности (КД) как таковой. И только огромный технологический задел советской эпохи и эффективный менеджмент международных коммерческих проектов позволяет поддерживать такой уровень КД, который пока позволяет Украине иметь статус космической державы.

Очевидно, что эффективно функционирующая космическая отрасль нуждается не только в определенном уровне финансирования, но и в современной системе выработки, реализации и контроля стратегических и программных решений. К сожалению, в нашей стране такая система отсутствует, более того, не осознана не-

обходимость ее разработки. Если в современном мире космическая деятельность рассматривается как важнейшая часть инновационной модели развития общества, то в Украине превалирует отношение к КД как затратной сфере, не вписывающейся в перечень первоочередных приоритетов. Вследствие этого текущее состояние КД можно характеризовать, по меньшей мере, такими моментами:

- практически полное отсутствие применения космической информации и технологий в практике и ближайших планах отраслевых министерств (экологический мониторинг, сельское и лесное хозяйство, транспорт, телекоммуникации и т. д.);
- организационная несовместимость украинской космической деятельности и международных программ и инициатив и, как результат, практически полное отсутствие международного сотрудничества (не смешивать с продажей услуг и техники);
- диаметрально противоположные взгляды в среде управленцев, политиков и общественности на роль и масштабы космической деятельности: от пропаганды масштабных (на уровне советских) космических проектов до полного отрицания ее необходимости;
- отсутствие стратегических документов и стратегирования как необходимой части процесса принятия решений.

По поводу последнего пункта отметим следующее. Достижение определенной цели в совре-

менной системе управления предполагает два сорта деятельности — конструктивную и экспертную. Первая решает вопрос, как достичь цели (продуктом этой деятельности является проект). Экспертная деятельность отвечает на вопрос, каковы последствия выполнения проекта, а также его невыполнения или осуществления альтернативного варианта (ее продукт — сценарный анализ). Без такого двуединого подхода в современной экономике немислимо принятие управленческих решений. К сожалению, в нашей практике (относится не только к космической деятельности) программные документы не имеют отношения к практическим решениям, а служат формальным основанием для выделения бюджетных средств.

В ходе разработки стратегического управления космической деятельностью необходимо получить ответы на некоторые принципиальные вопросы. Каков должен быть масштаб и приоритеты наших космических исследований, и, соответственно, уровень бюджетной поддержки? Сможет ли отечественная КД стимулировать инновационное развитие других отраслей? Имеет ли перспективу отечественная космическая индустрия при нынешней структуре и уровне технологий? Какова роль украинских космических исследований в контексте Глобальной стратегии исследований [7]?

Мы рассматриваем некоторые исходные положения процесса выработки космической стратегии Украины и предлагаем вариант подхода, который может привести к аргументированным ответам на поставленные вопросы.

#### **НОВАЯ ПАРАДИГМА СОВРЕМЕННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Не претендуя на полный обзор проблемы, отметим некоторые принципиальные особенности современной КД, которые необходимо осознавать при формулировании задачи построения стратегии КД Украины.

*Во-первых*, следует констатировать очевидное изменение парадигмы космической деятельности, а именно перехода от стратегической гонки во имя лидерства к приоритету устойчивого развития и ориентации на потребителя. Именно

поэтому в современных условиях не может быть собственно космических приоритетов, обусловленных исключительно закономерностями развития самой космонавтики. Из этого вытекает ключевой тезис современной космической политики, предполагающий подчиненность приоритетов космической деятельности основным национальным приоритетам (в экономике, безопасности, науке, образовании, повышении качества жизни граждан). Формирование технологической, научно-технической и кадровой политики жестко связано с возможностью космических технологий эффективно решать приоритетные государственные и общественные задачи. От этого зависит ответ на вопросы о масштабе и пропорциях развития новых систем, технологий и производственных мощностей.

*Во-вторых*, современная космическая индустрия фактически стала частью обычной экономики (ее путь напоминает роль авиации приблизительно сто лет назад). Судя по динамике развития, через 10—15 лет этот сектор будет одним из определяющих в мировой экономике. Уже сегодня в общем объеме финансирования (более 250 млрд долларов США) вложения частного капитала превысили все госбюджетные вложения и составляют приблизительно 75 %, а целые отрасли (в первую очередь телекоммуникационная) не потребляют бюджетных денег. Этот факт есть следствие коммерциализации военных технологий, в первую очередь спутниковых телекоммуникаций и навигации, а ожидаемый рост финансирования космических программ связывается с мощным притоком частных инвестиций.

Новая экономическая роль космонавтики определяется объективными потребностями современного информационного общества, в котором приоритет переходит от преимущественно производства товаров к производству услуг, проведению исследований, повышению качества жизни, а внедрение инноваций зависит в основном от получения новых знаний. Известно, что эффективность инноваций определяется в основном двумя факторами — финансированием и уровнем решаемых задач. Космонавтика задает высочайшие требования к научно-техническим разработкам и, соответст-

венно, определяет наивысшую эффективность инноваций.

Именно с этим фактором связана революционизирующая роль космонавтики в развитии важнейших отраслей экономики. Есть около 40 ключевых макротехнологий, определяющих уровень экономики, а аэрокосмические технологии занимают первое место в этом списке. Именно их потребности дали старт радиолокации, созданию легких жаропрочных сплавов, композиционных материалов, вычислительной цифровой техники, систем управления, двигателестроению, навигационным системам.

*В-третьих*, проблемы устойчивого развития и безопасности в современных условиях могут решаться только в контексте развития космических технологических систем.

Развитие КД трансформировало содержание геополитики, изменив приоритетность факторов, которые определяют безопасность и влияние государства. Современная геополитика включает в себя политику в космосе, которая определяется космической мощью — способностью использования гражданских, разведывательных, коммерческих космических систем и инфраструктуры для поддержания стратегии национальной безопасности, достижения национальных целей. Ключевая роль современных космических систем определяется их уникальными возможностями: высокой информативностью, разрешающей способностью, всепогодностью, а также возможностью доведения информации до каждого субъекта управления.

В настоящее время в рамках международных инициатив (GEOSS, GMES и некоторых других) решается проблема создания постоянно действующих космических систем глобального мониторинга. Характерная черта современного подхода — совместное использование космических навигационных, телекоммуникационных средств, а также данных наземных и космических наблюдений, что означает качественно новый уровень применения космических технологий в системах поддержки принятия управленческих решений.

И наконец, последняя из важнейших особенностей современной космонавтики, которую

следует упомянуть в этом кратком перечне. Речь идет о принципиальной ориентации современных космических программ на научные исследования. Термин «Exploration» наиболее точно отражает направленность современных космических программ. По-английски это означает исследование, в котором новое знание приобретает в процессе экспедиции, освоения новых рубежей. (В русском языке нет аналога, а соответствующее разъяснение теоретики НАСА приводят к английскому тексту).

Речь идет об исследовании в контексте принципиально нового этапа космонавтики, а именно освоения нового ресурса, каким является космическое пространство. На диаграмме, отражающей глобальную стратегию космических исследований, (см. сайт <http://www.globalspace-exploration.org>.) отмечено, что в настоящее время получены фундаментальные знания об околоземной орбите и начато ее освоение человеком. Следующая ступенька — Луна, планеты и малые тела Солнечной системы, о которых накапливаются знания, но освоение еще впереди... Направленность продвижения человека-исследователя объясняет абсолютную значимость современных исследований космоса. Происхождение Вселенной и человечества, закономерности коэволюции, и наконец наша судьба могут познаваться только в контексте современной парадигмы космических исследований, объединяющей космологию и квантовую механику.. При этом дискуссии о приоритетности пилотируемых или автоматических миссий, а также объектов изучения (Луна, Марс, астероиды или точки Лагранжа) не должны затенять принципиально новой роли собственно исследований космоса. Фундаментальные знания об окружающем нас пространстве становятся основой жизнедеятельности, обеспечения безопасности, освоения новых ресурсов, качества жизни и развития личности.

#### **СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ**

Соображения, приведенные выше — необходимое (хотя и неполное) введение в тему построения методологии КД Украины. В принципе мы далее будем придерживаться общепринятой



Рис. 1. Схема стратегического управления космической деятельностью

Таблица 1. Характеристические параметры подсистем космической деятельности

Направления КД	Субъекты	Продукция	Параметры
Промышленная сфера	Предприятия отрасли. КБ	Изделия космической техники. Технологии. Эксплуатация КТ	Номенклатура производства. Стоимость основных фондов. Количество инновационных технологий. Прибыльность. Целевая эффективность
Применение космических технологий	Предприятия отрасли. КБ. Институты отрасли и НАНУ	Сервисы (информационные, телекоммуникационные)	Качество сервисов. Объем информации
Наука	Институты отрасли и НАНУ. Университеты	Научное знание. Исследовательская аппаратура. Информация	Уровень знаний. Наличие научных разработок мирового уровня. Количество полученных патентов. Иновационность аппаратуры. Объем информации
Оборона и безопасность	Предприятия отрасли, КБ. Специализированные институты. Органы управления	Информация. Технологии. Управленческие решения	Целевая эффективность информации. Эффективность технологий. Уровень безопасности
Законодательство	Специализированные институты	Законодательные акты	Качество (эффективность) законодательных документов
Образование	Институты отрасли, НАНУ и МОНУ	Научные кадры. Научно-методические разработки.	Параметры количества и качества научных кадров, научно-методических материалов
Государственное управление	НКАУ	Программные и нормативные документы планы НИОКР и др.	Параметры эффективности управления
Иновационное влияние на другие отрасли	Предприятия отрасли. Институты отрасли и НАНУ	Технологии. Улучшенные решения. Аппаратура и системы	Иновационные технологии. Эффективность использования

концептуальной схемы стратегического управления [1], которая предполагает следующие необходимые этапы. А именно, анализ внешних факторов, внутреннего состояния системы, формулировка на этом основании целеположения, а затем выработку сценариев, которая корректируется в ходе оценки их эффективности (рис. 1).

Вместе с тем представляется, что следствия из соображений, приведенных выше, накладывают существенные ограничения на содержание последующего анализа, предписываемого схемой рис. 1. Попытаемся сформулировать их, учитывая, что они будут служить исходными положениями последующего процесса построения стратегии.

Из новой парадигмы современной космонавтики следует, что облик и приоритеты украинской космической деятельности в принципе не выводятся из предыдущего (советского) опыта. То, что мы имеем сейчас, в значительной степени является частью несуществующего целого, а модель будущей КД должна строиться, исходя из современных потребностей и вызовов. Процесс современного стратегического управления может быть представлен в виде схемы на рис. 2: построение модели будущей КД, а затем формирование траектории перехода от настоящего к будущему. Ситуация по форме близка к той, которая обосновывает необходимость технологического предвидения (*предсказание качественно нового технологического уклада*) в отличие от прогноза (который фактически является экстраполяцией сегодняшних тенденций на ближайшее будущее) [3, 4].

Важно отметить, что модель будущей КД представляет собой систему, описание которой достаточно сложно формализовать. В табл. 1 представлен вариант представления подсистем КД, основанный на различии конечного продукта каждой из подсистем, что может служить основой введения набора параметров, их описывающих. Понятно, что траектория, показанная на рис. 2, является результатом сложения различных траекторий выделенных подсистем, причем некоторые из них заведомо лежат в разных плоскостях.



Рис. 2. Стратегическое управление космической деятельностью

Таким образом, под **стратегическим управлением** будем понимать деятельность, схематично показанную на рис. 2, а именно направленную на достижение новой конфигурации КД. Важно понимать, что это не есть управление функционированием системы, а именно ее развитием. **Стратегию космической деятельности** определим как установление основных долгосрочных целей КД, а также направления действий и ресурсов, необходимых для достижения поставленных целей. Или, другими словами, как систему смыслообразующих намерений, которая опирается на имеющиеся или создаваемые ресурсы и имеет временные рамки для осуществления поставленных целей.

Отметим, что выработка стратегии преследует практические цели, поэтому мы не будем обсуждать достоинства приведенного определения по сравнению с другими возможными (их не менее 10), а попытаемся кратко проиллюстрировать примерами конкретных стратегий.

На рис. 3 схематично показан пример национальной космической стратегии Канады [6]. На основании вербального описания целей, задач и направлений (SPACE VISION) выработана общая стратегия, состоящая из четырех стратегий по конкретным направлениям деятельности, на основании которых разрабатываются программы, а также обеспечивающая деятельность.

Для национальных стратегий характерна иерархия целей, на реализацию которых направлены конкретные действия. Так, общая стратегическая цель космической стратегии США не меняется уже много лет и состоит в обеспечении глобального лидерства США в космосе, что должно достигаться безусловным первенством в



Рис. 3. Космическая стратегия Канады

нескольких выбранных направлениях и высоким уровнем во всех остальных [5]. При этом стратегии в конкретных сферах КД изменялись достаточно часто. Так, в течение последних 10 лет космическая стратегия в области обороны и безопасности изменялась дважды (последний раз в 2004 г.), а в области космических исследований не менее трех раз. Так в 1990-е годы администратором НАСА Д. Голдином была выдвинута концепция «быстрее, дешевле, лучше», которая предусматривала реализацию большого числа недорогих автоматических миссий к телам Солнечной системы. При этом задача стратегии решалась путем обеспечения «виртуального присутствия человека в космосе». В 2004 г. Президент США Дж. Буш выдвинул концепцию «возвращения на Луну», делавшую акцент на пилотируемых полетах, строительство лунной базы как этап последующей экспедиции на Марс. Нынешняя стратегия космических исследований приоритетной считает технологический прорыв в средствах доставки, а конкретный облик космических миссий будет определен после завершения первого этапа разработок.

В «Белой книге» европейской космической политики провозглашена главная цель деятельности в космосе — обеспечение конкуренто-

способности ЕС на основе развития прорывных космических технологий [8]. При этом выработаны стратегии в ключевых направлениях. Так, в области изучения Земли из космоса — построение глобальной мониторинговой системы GMES, в области науки — программа АВРОРА, в области навигации — построение глобальной навигационной системы GALILEO... При этом деятельность в каждом из направлений имеет целью решение фундаментальных задач европейской политики (повышение уровня жизни, обеспечение прав и свобод личности, укрепление европейского единства и т. д.).

Общая цель современных космических стратегий разных стран может быть определена как *эффективное использование космических средств, технологий и информации в интересах решения национальных задач*. Для Украины трудность выработки космической стратегии в первую очередь связана с неопределенностью выбора во многих важнейших сферах общественного развития, отсутствием формально закрепленных концептуальных или стратегических документов такого развития. Поэтому при формулировке приоритетов и задач космической деятельности неизбежно возникнет неопределенность как при их





Рис. 4. Установление целевой ориентации космической деятельности (с точки зрения национальных интересов)

формулировании, так и при оценке эффективности предлагаемых сценариев. Отсюда следует, что методика выработки целей КД должна предусматривать различные срезы анализа проблемы.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ВЫРАБОТКА СЦЕНАРИЕВ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Этап формулирования целевой ориентации украинской космической деятельности должен, как представляется, включать как минимум два вида экспертного анализа.

Во-первых, это взгляд «изнутри», то есть совокупность мнений специалистов о приоритетах национальной космической деятельности с точки зрения достигнутых результатов, потенциала,

востребованности и конкурентоспособности конкретного направления. Этот анализ обычно представляют в виде аналитического обзора, в котором приоритеты формулируются на основе внутренней логики развития конкретных видов деятельности. Такого рода документ (SPACE VISION, видение КД в целом или конкретного направления) дает возможность лицам, принимающим решение, изучить аргументацию специалистов относительно перспектив конкретных направлений.

Во-вторых, необходим анализ предполагаемых направлений КД с точки зрения их роли в решении общегосударственных задач. На рис. 4 приводится вариант построения иерархии целей КД, который предполагает введение пара-

Таблица 2. Пример обобщенной характеристики сценария

Основная цель сценария	Приоритетные цели	Позитив	Негатив
Создание системы мониторинга Земли из космоса	<p>Обеспечение непрерывной спутниковой информацией при решении экологических проблем, задач рационального природопользования, охраны окружающей среды, контроль последствий стихийных и техногенных бедствий.</p> <p>Повышение уровня безопасности и обороны за счет использования космического наблюдения (двойное назначение).</p> <p>Участие в выполнении глобальных международных программ (климатические изменения, глобальное потепление и т.п.).</p> <p>Развитие внутреннего рынка ГИС-технологий.</p>	<p>Решение актуальных проблем экономики и безопасности на принципиально новом уровне.</p> <p>Сотрудничество со странами ЕС в направлении, являющимся приоритетом европейской и международной космической политики.</p> <p>Возможность двойного использования спутниковых данных.</p> <p>Развитие направления, имеющего большие наработки.</p>	<p>Трудности, связанные с конкуренцией на развитом рынке ДЗЗ.</p> <p>Трудности, связанные с непониманием органами управления необходимости спутниковых данных.</p> <p>Трудности, связанные с неподготовленностью пользователей.</p>

метров (весовых множителей), определяющих относительную важность достижения каждой из обозначенных целей. В этом подходе возможна формализация проблемы и выработка оценки эффективности на основании выбранной процедуры учета мнений экспертов.

Кроме того, представляется важной общественная дискуссия относительно выбора приоритетных направлений и ожидаемых результатов. Это признано необходимым не только для учета мнений непрофессионалов, но и для разъяснения широкому кругу лиц конкретных преимуществ реализации космических программ. Отметим по этому поводу, что в США реализуются программы, которые имеют поддержку не менее 50 % граждан.

Разумеется, обсуждаться должны не формулировки целей и направлений, а конкретные сценарии, которые предусматривают различные пути достижения выбранных целей. В табл. 2 приводится упрощенный вариант характеристики одного из рассматривавшихся сценариев (в котором приоритетным заданием выбрано создание системы космического мониторинга). В таблице приведены основные ожидаемые результаты, достоинства и недостатки, выделен-

ные экспертами. Далее предполагается оценка такого сценария с точки зрения целевой эффективности на основе количественных параметров (весовых множителей).

Отметим, что в предлагаемом подходе генерация определенного сценария, где некоторое направление выделяется в качестве приоритета, не означает игнорирование прочих направлений. Однако контекст, в котором оценивается то или иное направление деятельности, определяется вероятностью достижения заданной цели.

И последнее: рассматриваемый подход представляется открытым для независимого анализа, в котором могут генерироваться альтернативные сценарии, модифицироваться система оценок на той базе, которая содержится в базовых аналитических материалах и мнениях экспертов.

1. Дацюк С. Популярно про стратегію та стратегування-1. Що заважає нам мати стратегію? [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.pravda.com.ua>.
2. Довгань Л. С., Каракай Ю. В., Артеменко Л. П. Стратегічне управління: Навчальний посібник. — К.: Центр учбової літератури, 2009. — 440 с.
3. Закон України «Про затвердження Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2008—2012 роки» № 608-VI від 30 вересня

- 2008 р. [Электронный ресурс] // Відомості Верховної Ради України. — 2009. — № 12. — С. 148. — Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua>.
4. Згуровский М. З., Панкратова Н. Д. Системный анализ: проблемы, методология, приложения. — К.: Наук. думка, 2005. — 744 с.
5. 2006 NASA Strategic Plan [Online] / National Aeronautics and Space Administration. — Washington, 2006. — 48 p. — Available : <http://www.nasa.gov>.
6. The Canadian Space Strategy [Online] / Canadian Space Agency, 2003. — 27 p. — Available: <http://www.space.gc.ca>.
7. The Global Exploration Strategy [Online], 2007. — 25 p. — Available: <http://www.globalspaceexploration.org>.
8. White Paper. Space: a new European frontier for an expanding Union. An action plan for implementing the European Space policy [Online] / Commission of the European Communities. — Brussels, 2003. — 61 p. — Available: <http://eur-lex.europa.eu>.
9. Zgurovsky M. The scenario analysis platform as a methodological base of the national foresight program of Ukraine // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2003 — № 1. — С. 7—25.

Надійшла до редакції 17.12.10

*O. P. Fedorov, L. N. Kolos*

#### UKRAINIAN SPACE ACTIVITY: SOME APPROACHES TO THE STRATEGY DEVELOPMENT

We propose some approaches to the development of the scientific background for the formation of Ukrainian space strategy using the ideology of strategic management. Some fundamental features of modern space policy are considered that would be taken into account in forming the strategy for Ukrainian space activity. A scheme for the structuring of space activity and the procedure for making the characteristic parameters of each of the areas and for their estimation are proposed.

УДК 550.385

**В. Д. Кузнецов, Ю. Я. Ружин, В. М. Синельников**

Институт земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова  
Російської академії наук, Троїцьк, Росія

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МКС

---

*Приводяться результати низки геофізичних експериментів з нагрівання іоносфери стендом «Сура», під час яких проводились координовані спостереження з використанням наукової апаратури «Фіалка» на борту РС МКС. Коротко описано експерименти, що готуються до реалізації на РС МКС.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Геофизические эксперименты на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) проводятся в рамках «Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС». Целью этих экспериментов и исследований является изучение геофизических процессов из космоса, включая процессы, протекающие в верхней атмосфере Земли и околоземном космическом пространстве.

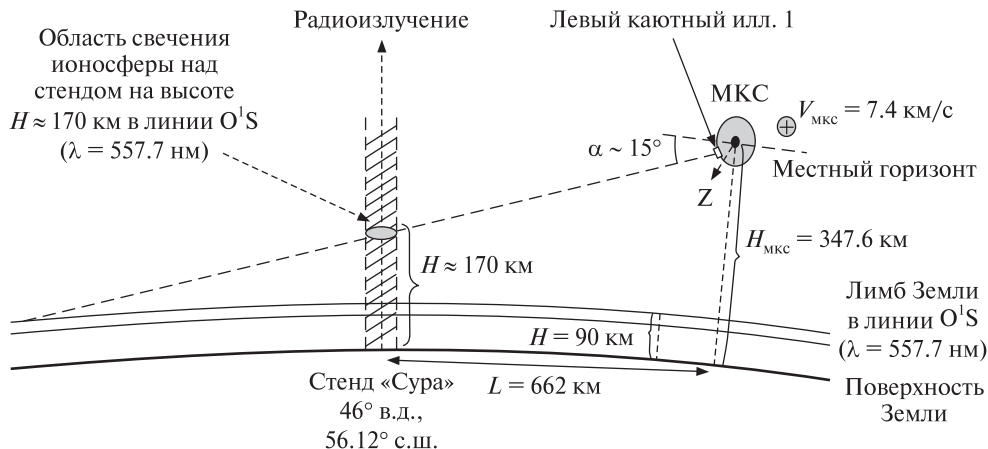
Международная космическая станция осуществляет свой полет на высотах около 350 км в ионосфере Земли, которая является чувствительным индикатором гелиогеофизических явлений в системе «Солнце — Земля» и в системе «литосфера — атмосфера». Воздействие солнечных активных явлений — вспышек и выбросов — сильно влияет на состояние ионосферы, вызывая нарушение радиосвязи, флуктуации сигналов навигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS, разбухание атмосферы и аномальное торможение МКС и спутников в периоды магнитных бурь. Активные литосферные процессы — процессы подготовки землетрясений, извержения вулканов и др. также имеют свои проявления в ионосфере, которые в последнее время активно изучаются для поиска предвестников землетрясений и их диагностирования. Кроме этого, в ионосфере регистрируются результаты антропо-

генной деятельности — электромагнитная загрязненность промышленных регионов, сигналы от многочисленных вещательных станций, исследовательских нагревных установок (типа российская «Сура» и американская HAARP). Таким образом, ионосфера является важнейшим элементом геофизических исследований и многочисленных приложений, она же является естественной средой обитания МКС. Все это говорит о важности и актуальности той части программы исследований на МКС, которая связана с геофизическими исследованиями.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ «СУРА» («МКС-СУРА»)

С использованием научной аппаратуры «Фиалка-МВ-Космос» (далее «Фиалка») (высокочувствительная радиометрическая УФ-камера с усилителем изображения, рабочая область 200—350 нм) (эксперимент «Релаксация») в период 2007—2009 гг. выполнена серия наблюдений при проведении комплексных экспериментов с нагревным стендом «Сура». В этих экспериментах осуществлялся нагрев ионосферы мощными радиоволнами над областью стенда (г. Васильсурск, Нижегородская область, 56.12° с. ш., 46° в. д.). Аппаратурой «Фиалка-МВ-Космос» проводились наблюдения свечений в предполагаемой области нагрева. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Серия экспериментов «МКС-Сура» включала шесть сеансов, во время которых работа стенда «Сура» сопровождалась наблюдениями с борта



**Рис. 1.** Схема эксперимента по наблюдениям ионосферы над областью нагревного стэнда «Сура» аппаратурой «Фиалка» на РС МКС (2 октября 2007 г., МКС-15)

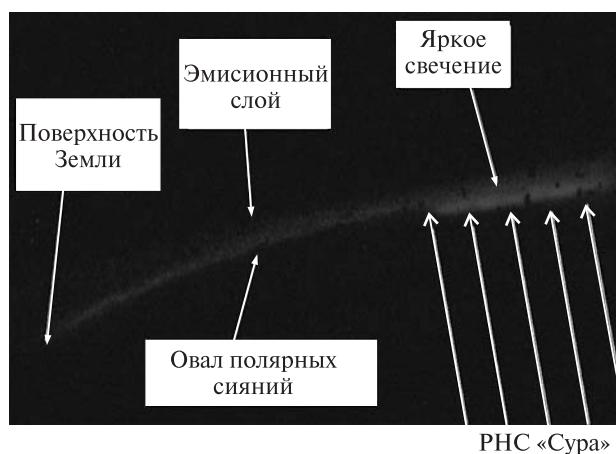
МКС, а также сопутствующими наземными наблюдениями 2 октября 2007 г., 26 сентября 2008 г., 16 марта 2009 г., 20 апреля 2009 г. (наблюдения с борта МКС в магнитосопряженной области), 9 ноября 2009 г., и 10 ноября 2009 г.

Основные характеристики стэнда «Сура» при проведении эксперимента: частота радиоволн нагрева 4.3—9.5 МГц, мощность передатчиков  $3 \times 250$  кВт, эффективная мощность излучения составляла 10—80 МВт. Приведенные параметры нагревного стэнда обеспечивают достижение на высотах ионосферы (около 300 км) условий для нагрева электронов согласно нелинейной теории взаимодействия радиоволн с ионосферной плазмой [1]. Во всех экспериментах использована рабочая частота 4.3 МГц с поляризацией обыкновенной волны, которая всегда превышала критическую частоту ионосферного слоя F2. При этом мощным радиоизлучением стэнда засвечивался весь объем по высоте ионосферы в пределах диаграммы направленности антенны стэнда.

В эксперименте 2 октября 2007 г. минимальное расстояние между МКС и стэндом «Сура» составляло 750 км, и в период действия радионагревного стэнда аппаратурой «Фиалка» с борта МКС была зарегистрирована область свечения (см. рис. 2), расположенная северо-восточнее стэнда (150—200 км) и перемещающаяся на восток в плоскости кадра. Яркость свечения составляла десятки килоэрэллерей. Наблюдаемое свечение происходило на спокойном фоне первого эмиссионного слоя и аврорального овала как до,

так и после прохождения МКС стэнда «Сура». Проведенный анализ показал, что заметных геблиогеофизических аномалий во время эксперимента не было, межпланетное магнитное поле было очень спокойное, скорость солнечного ветра — минимальная, планетарный индекс  $K_p$  во время эксперимента составлял всего  $K_p = 1.5$  (не более 3), по данным радарных наблюдений авроральный овал был спокойным.

По данным ближайшей к стэндом «Сура» магнитной обсерватории Карпогоры (ИЗМИРАН) после нагревных импульсов наблюдались возмущения  $H$ - и  $D$ -компонентов геомагнитного поля. На этой основе, а также наблюдавшегося



**Рис. 2.** Регистрация свечения в период действия радионагревного стэнда (РС) «Сура» на ионосферу Земли аппаратурой «Фиалка-МВ-Космос» (2 октября 2007 г., МКС-15)

свечения можно предположить возможность того, что это свечение было стимулировано нагревными импульсами «Суры», т. е. является искусственным. Мощности станда «Сура» явно недостаточно, чтобы вызвать яркое свечение непосредственно нагревом ионосферной плазмы, поэтому явление может быть связано с эффектом модулированного нагрева, когда период нагревных импульсов близок к периоду собственных колебаний альвеновской моды плазмы магнитной силовой трубки, опирающейся на пятно (узел стоячей волны).

В результате происходит модификация ионосферной интегральной проводимости. Периодическое изменение проводимости модулирует условия для устойчивых колебаний, характерных для спокойных условий. Сами колебания могли быть вызваны слабым коротким (меньше 1 мин, амплитуда около 2 нТл) импульсом в геомагнитном поле планетарного характера.

Из других обнаруженных с использованием аппаратуры «Фиалка» эффектов от нагревного станда «Сура» в проведенных экспериментах «МКС-Сура» можно отметить регистрацию оптического свечения (предположительно молекул кислорода, линия  $\lambda = 761.9$  нм), промодулированное периодичностью работы нагревного станда, в эксперименте 16 марта 2009 г. Этот эффект был ярко выражен в момент пролета МКС вблизи станда и резко исчезал при его выключении в конце сеанса.

Эксперимент по наблюдениям с МКС области в южном полушарии, магнитосопряженной со областью ионосферы над стандом «Сура», был проведен 20 апреля 2009 г. Было зарегистрировано слабое свечение, положение которого соответствует расчетной (модель IGRF 2010) магнитно-сопряженной области для станда «Сура». Обнаруженное свечение можно трактовать как искусственное полярное сияние, вызванное работой станда, так как оно отсутствовало как до, так и после пролета МКС вдоль орбиты во время эксперимента. Отметим также, что эксперимент проведен в спокойных ночных условиях, судя по параметрам гелио-геомагнитной активности. Предварительное изучение видеозаписи области свечения, магнитосопряженной со стандом

«Сура», показало наличие слабосветящихся «пятен», коррелирующих с работой станда «Сура» при пролете МКС на минимальном расстоянии от этой области. Более подробное описание проведенных экспериментов «МКС-Сура» можно найти в работах [2, 3].

#### ЭКСПЕРИМЕНТ «ИМПУЛЬС»

В рамках эксперимента «Импульс-1» проведена отработка плазменного инжектора для изучения взаимодействия пучков плазмы с ионосферой, выполнены тестовые инъекции, по результатам которых проводится коррекция параметров инжектора для проведения второго этапа эксперимента («Импульс-2»). Параметры импульсного инжектора плазмы: скорость ионов 30—40 км/с, степень ионизации плазмы  $\beta = 10\%$ ; периодичность  $1.8 \pm 0.2$  Гц; длительность импульса — около 10 мкс.

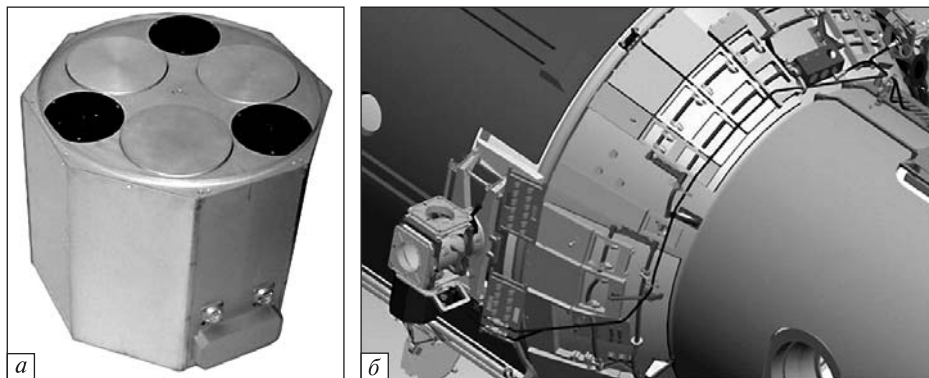
#### ЭКСПЕРИМЕНТ «МОЛНИЯ-ГАММА»

Эксперимент «Молния-гамма» является продолжением ранее осуществленного эксперимента «Молния-СМ», основной целью которого была отработка видеометрической системы ВФС-3М для регистрации оптических свечений от молниевых разрядов. В рамках эксперимента «Молния-гамма», научная аппаратура (см. рис. 3) которого («Фотон-гамма») подготовлена к доставке на борт РС МКС, предполагается провести исследование атмосферных вспышек оптического и гамма-излучения в условиях грозовой активности.

Целью эксперимента является изучение природы высотного разряда «спрайт» — мощного всплеска оптического излучения из грозовой зоны; проверка механизма возникновения «спрайта» как пробоя на убегающих электронах [4]; изучение свойств, частоты возникновения и интенсивности импульсного гамма-излучения для практических целей — безопасности полетов в грозовой атмосфере.

Параметры научной аппаратуры: диапазон энергий гамма-датчиков — 0.3—1 МэВ, время измерений — 16 мкс; угол поля зрения каждого из трех оптических датчиков  $\pm 32^\circ$ , спектральный диапазон датчика красного свечения

**Рис. 3.** Научная аппаратура «Фотон-гамма» эксперимента «Молния-гамма» — блок внешних датчиков — три гамма-детектора и три надирных фотометра (а) и установка блока внешних датчиков на служебном модуле РС МКС (б)



$\lambda\lambda = 0.65...0.75$  мкм, чувствительность датчика красного свечения — не хуже  $0.5$  мкВт/м<sup>2</sup>, спектральный диапазон датчика голубого свечения  $\lambda\lambda = 0.39...0.43$  мкм, чувствительность датчика голубого свечения — не хуже  $80$  нВт/м<sup>2</sup>, спектральный диапазон датчика грозовых разрядов  $\lambda\lambda = 0.8...1.0$  мкм, чувствительность датчика грозовых разрядов — не хуже  $0.1$  мВт/м<sup>2</sup>.

Схема космического эксперимента с аппаратурой «Фотон-гамма» предполагает проведение сеансов наблюдений на теневых участках верхней атмосферы Земли в оптическом и гамма-диапазонах. При этом должен быть реализован отбор событий, связанных с одновременной регистрацией оптических и гамма-вспышек. Для этих событий предполагается запись временных профилей с высоким разрешением, а также запись энергетических спектров в гамма-диапазоне. Начало эксперимента запланировано на 2011 г.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ «СЕЙСМОПРОГНОЗ-СМ»

Эксперимент «Сейсмопрогноз-СМ» направлен на экспериментальную отработку методов мониторинга электромагнитных и плазменных предвестников землетрясений, чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф. Научная аппаратура эксперимента (плазменно-волновой диагностический контейнер) состоит из двух радиофизических модулей — радиочастотного спектроанализатора и аппаратуры спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. Комплекс научной аппаратуры будет обеспечивать определение характеристик распространения радиосигналов спутниковых систем навигации в режиме радио-

затменных измерений и построение высотных профилей электронной концентрации ионосферы (до высоты МКС); измерение спектра плазменных колебаний в ионосфере и пространственно-временного распределения электронной концентрации ионосферы вдоль орбиты МКС. Параметры научной аппаратуры: плазменный радиоспектрометр — диапазон часто принимаемых сигналов —  $0.05...15$  МГц, пороговая чувствительность —  $6$  мкВ (на частоте  $50$  кГц), не более  $1$  мкВ ( $1$  МГц), не более  $1$  мкВ ( $15$  МГц); навигационный приемник — число каналов слежения за спутниками —  $20$ , обрабатываемые сигналы — С/А, Р1, Р2; относительная погрешность измерений: кодовой задержки —  $10$  см, фазовой —  $0.1$  мм. На РС МКС плазменно-волновой диагностический контейнер будет устанавливаться на посадочное место аппаратуры эксперимента «Молния-гамма» после его завершения. Ориентировочный срок реализации эксперимента — 2012—2013 гг.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ «ГИДРОКСИЛ-МКС»

Задачами эксперимента «Гидроксил-МКС» («Оптические наблюдения состояния верхней атмосферы для прогнозирования геофизических катастроф. Создание методик глобального мониторинга состояния верхней атмосферы») являются исследования долговременной изменчивости гидроксильного излучения ( $\lambda\lambda = 840...1040$  нм, высоты  $80...93$  км) и излучения зеленой линии атомарного кислорода ( $\lambda = 557.7$  нм, высоты  $88...110$  км) и их связи со структурными параметрами атмосферы; разработка эмпири-

ческих моделей распределения интенсивностей этих излучений в зависимости от гелио-геофизических условий; применение данных об эмиссиях для разработки методов диагностирования землетрясений и других природных и техногенных катастроф. Научная аппаратура эксперимента — спектрофотометрический комплекс — состоит из двух оптических модулей: модуль гидроксильных свечений ( $\lambda\lambda = 840\text{...}1040$  нм) и модуль свечений атомарного кислорода в зеленой линии ( $\lambda = 557.7$  нм). Наблюдения будут проводиться по линии горизонта, по касательной к излучающему слою. Они позволят определять изменения характеристик атмосферы под влиянием солнечной и антропогенной деятельности, регистрировать свечения над сейсмоактивными областями, оценивать количество водяного пара и значений температуры в широком диапазоне высот. Эксперимент предполагается осуществить на многоцелевом лабораторном модуле РС МКС. Ориентировочные сроки начала эксперимента 2011—2012 гг.

Эксперименты «Молния-гамма» и «Гидроксил» выполняются в кооперации с научно-исследовательским учреждением «Институт при-

кладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белгосуниверситета.

1. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — С. 67—71.
2. Ружин Ю. Я., Иванов К. Г., Кузнецов В. Д., Петров В. Г. Контролируемая инъекция радиоимпульсов в ионосферно-магнитосферную систему и появление микросуббури 2 октября 2007 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2009. — **49**, № 3. С. 342—352.
3. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Карабаджак Г. Ф. и др. Космический эксперимент «Сура-МКС» (2 октября 2007 года) // Космонавтика и ракетостроение. — 2009. — № 4. — С. 66—70.
4. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. — 1992. — **165**, N 5—6. — P. 463—468.

*Надійшла до редакції 17.12.10*

*V. D. Kuznetsov, Yu. Ya. Ruzhin, V. M. Sinelnikov*

#### GEOPHYSICAL EXPERIMENTS ABOARD THE ISS

The results of a series of experiments on heating the ionosphere through the «Sura» facilities with coordinated observations aboard the ISS are presented. The experiments aboard the ISS which are on the stage of preparation are briefly described.



УДК 523.9, 551.509.336

**Л. И. Мирошниченко**

Институт земного магнетизма, ионосферы і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова  
Російської академії наук, Тройцьк, Росія

## **ПРОБЛЕМА «СОЛНЦЕ — ЗЕМЛЯ»: СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ**

---

*Представлено короткий огляд сучасних даних і концепцій проблеми «Солнце — Земля», актуальних напрямків досліджень і передбачуваних механізмів сонячно-земних зв'язків. Ця широка область охоплює низку дуже важливих фундаментальних і прикладних проблем (фізика Сонця, динаміка міжпланетного середовища і властивості ближнього навколосонячного простору, космічна погода, радіаційна небезпека в космосі, функціонування космічних і наземних технологічних систем, геліобіологія та ін.). Сонячно-земна фізика в цілому також тісно пов'язана з деякими глобальними світоглядними проблемами. Приведено окремі найхарактерніші приклади сонячно-земних зв'язків.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Интерес к космическим влияниям на Землю был всегда [12], но лишь в середине 20-го века эта неопределенная область космофизики вооружилась запасом необходимых знаний и получила концептуальную основу [1, 2, 7]. Особое место в проблеме «Земля — Космос» занимают солнечно-земные связи (СЗС), которые, конечно, являются частью цепочки солнечно-планетных связей в целом. По существу речь идёт о воздействии центрального светила Солнечной системы на всю околосолнечную среду (гелиосферу), включая и нашу Землю. При таком подходе удаётся правильно понять место солнечно-земных связей в общей проблеме «Солнце — планеты». По понятным причинам, однако, проблема «Солнце — Земля» занимает исключительное место в космофизических и геофизических исследованиях, так как всё межпланетное и околоземное пространство представляют собой необходимую часть «среды обитания» для человечества.

### **ОСНОВНЫЕ ЭФФЕКТЫ**

Обычно в цепочке солнечно-земных связей рассматривают следующие каналы влияния Солнца

на Землю: 1) воздействие на магнитосферу и ионосферу; 2) солнечно-тропосферные связи; 3) гелиобиология (Солнце и биосфера); 4) солнечная активность и процессы в литосфере (неравномерность вращения Земли, сейсмические явления); 5) резонансная структура и ритмы Солнечной системы; 6) энергетический и информационный аспекты солнечно-земных связей.

Изучение отдельных звеньев солнечно-земных связей идёт, разумеется, в необходимом контексте с практическими (прогностическими) аспектами. И тут часто и неожиданно обнаруживаются нерешённые проблемы даже в таких, казалось бы, хорошо изученных областях, как механизмы взаимодействия в цепочке «солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера — атмосфера». Например, ещё в 1981 г. для описания взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой была предложена эмпирическая формула (параметр Акасофу [13]), которая позволила физически связать долю энергии, отбираемой магнитосферой у солнечного ветра (т. е. эффективность её передачи), с размерами магнитосферы, скоростью солнечного ветра, направлением и величиной межпланетного магнитного поля (ММП). Этот параметр даёт разумные оценки полной энергии, поступающей от солнечного ветра внутрь магнитосферы. Тем не менее, в последние годы применимость параметра Акасофу подвергается сомнению [14, 19]. Некоторые

исследователи считают, что для более точной оценки энергетического баланса магнитосферы необходимо учитывать эффект вязкого трения солнечного ветра с магнитосферой.

Более того, недавно было показано [11], что в прошлом роль скачков плотности солнечного ветра в геомагнитных возмущениях явно недооценивалась по сравнению с ролью скачков его скорости. Действительно, анализ предбуревых распределений параметров солнечного ветра даёт основания полагать, что плотность вносит основной вклад в изменения динамического давления солнечного ветра. Иными словами, плотность является важным геоэффективным фактором, сопровождающим начало бури, а скорость и направление вертикальной составляющей ММП ( $V_z$ ) влияют на интенсивность и последующее развитие магнитной бури. Можно даже предположить, что начало большинства бурь связано с изменением плотности солнечного ветра.

Значительное внимание в последние десятилетия обращается на ожидаемое или реально наблюдаемое воздействие геофизических возмущений на точность прецизионных физических измерений и лабораторных экспериментов [2], а также надёжность астрономических наблюдений [8]. Особое место занимает изучение гелиобиологических аспектов СЗС. При этом учитывается многофакторный характер проблемы, а также нестационарность и нелинейность так называемых магнитобиологических эффектов (МБЭ) [9], т. е. отклика биологических объектов на действие слабых естественных электромагнитных полей (ЭМП).

#### **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ**

По современным представлениям физические механизмы и каналы воздействия солнечной активности (СА) отличаются большим разнообразием и сложностью. Некоторые механизмы СЗС взаимодействуют между собой, конкурируют или усиливают друг друга. Их далеко не полный перечень выглядит так: 1) электромагнитное излучение Солнца; 2) ударные волны в солнечном ветре; 3) ионизирующая радиация (галактические и солнечные космические лучи); 4) низкочас-

тотные пульсации магнитосферы; 5) генерация инфразвука в полярной атмосфере; 6) образование космогенных изотопов и нитратов; 7) триггерный механизм в различных явлениях СЗС; 8) резонансные связи в Солнечной системе и земных оболочках.

Среди физических агентов влияния рассматриваются в первую очередь полный поток солнечного излучения, электромагнитные волны и поля, солнечный ветер, энергичные солнечные частицы (солнечные космические лучи), а также галактические космические лучи (ГКЛ), космическая пыль и другие. При этом обсуждается применимость того или иного механизма к проблеме «Солнце — Земля». Принимаются также во внимание иерархия, нелинейный характер и реальная (или кажущаяся) неоднозначность СЗС. Большинство из действующих или предложенных механизмов всё ещё нуждаются в тщательной теоретической разработке, развитии и наблюдательном или экспериментальном подтверждении. Ниже приведены несколько характерных эффектов СЗС и дана их современная интерпретация с точки зрения возможных механизмов.

#### **СОЛНЕЧНО-ТРОПОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ**

Изменчивость земной погоды и долговременные колебания климата привлекают в последние десятилетия повышенное внимание астрономов и геофизиков. При этом исследования солнечно-тропосферных связей развиваются в нескольких направлениях: статистические данные, численное моделирование, физическое (лабораторное) моделирование на Земле и натурные эксперименты в околоземном пространстве.

Их результаты можно суммировать следующим образом.

1. Гелиосфера влияет на земной климат (солнечный ветер, ММП, космическая пыль и др.).
2. На климат могли влиять нерегулярные инверсии геомагнитного поля в далёком прошлом.
3. Есть аналогия с процессами, наблюдаемыми в камере Вильсона (образование капелек тумана вдоль следа проходящей заряженной частицы).
4. Важна нуклеация (конденсация паров воды), прежде всего на отрицательных зарядах в атмосфере.

5. Возможно искусственное влияние на осадки посредством ионизирующих излучений (экспериментальная метеорология).

6. Влияние ионизации на образование облаков может быть проверено в лабораторных условиях, как это делается в Институте оптики атмосферы в Томске [5], или на ускорителе заряженных частиц в ЦЕРНе (Experiment CLOUD [16]).

Рассмотрим воздействие солнечной активности на параметры атмосферы Земли на примере вариаций геопотенциала. Этот параметр описывает работу, совершаемую при поднятии единицы массы воздуха в поле силы тяжести Земли от исходного уровня с давлением  $P(0)$  на высоту с давлением  $P(h)$ . Пионерская работа [17] убедительно продемонстрировала изменения температуры в стратосфере, связанные с циклом солнечной активности. Были изучены среднегодовые значения высоты геопотенциальной поверхности с давлением 30 гПа над Гавайскими островами в субтропической зоне Тихого океана. Эти значения являются мерой среднего значения температуры атмосферы ниже уровня 24 км. Как выяснилось, температура варьирует в фазе с потоком солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см в течение 3.5 солнечных циклов (1957—1993 гг.). Амплитуда вариаций указывает на то, что нижняя атмосфера в максимуме цикла оказывается на 0.5—1.0 К теплее, чем в минимуме цикла. Это — весьма сильный отклик атмосферы на «солнечный сигнал». Из данных [17], однако, не ясно, является ли этот эффект локальным или глобальным. Неизвестно также, как эта температурная аномалия изменяется с высотой.

В 2010 г. появились косвенные свидетельства [15, 20] того, что солнечная активность оказывает долговременное воздействие на состояние термосферы Земли (интервал высот 200—800 км). На таких высотах вращается большинство искусственных спутников Земли (ИСЗ). Специалисты NASA проанализировали деградацию орбит 5000 спутников, обращавшихся в диапазоне высот 200—600 км над Землёй в 1967—2010 гг. (почти четыре цикла СА). Как известно, деградация орбит обусловлена аэродинамическим сопротивлением термосферы, т. е. её плотностью. Результаты анализа показывают, что на репер-

ной высоте около 400 км плотность термосферы испытывала значительные колебания, причём в течение последних четырёх циклов СА наблюдалась тенденция к её систематическому уменьшению. Более того, в 2008—2009 гг., т. е. в минимуме 23-го цикла плотность термосферы оказалась на 28 % ниже ожидаемой (если исходить из величины её систематического тренда в предыдущих циклах).

Согласно оценкам NASA в текущий, небывалый прежде «провал» (минимум) в солнечной активности, «коллапс» термосферы оказался в 2—3 раза более глубоким, чем когда бы то ни было прежде за всю историю космических полётов. Более того, коллапс термосферы оказался более глубоким, чем можно было бы объяснить современными моделями. Нельзя исключить, что вклад в изменение плотности термосферы могли внести парниковые газы. Однако в любом случае с привлечением всех мыслимых гипотез и моделей термосферы ожидаемый эффект не превысит 40 %. Пытаясь найти альтернативное объяснение, в работе [20] обращено внимание на аномальное уменьшение потока солнечного излучения в крайней ультрафиолетовой области (100—280 нм) в 2007—2009 гг. Такое уменьшение, зафиксированное в измерениях на борту космических аппаратов SOHO и TIMED, а также в суборбитальных полётах ракет, как раз и может быть истинной (солнечной) причиной уменьшения плотности.

#### КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ОБРАЗОВАНИЕ ОБЛАКОВ

Одним из возможных триггерных механизмов в цепочке СЗС может служить механизм влияния ГКЛ на тропосферные процессы [4]. В этом механизме взаимодействие между основным потоком солнечной энергии в тепловой машине «атмосфера» и потоком энергии ГКЛ происходит в тропосфере через ионизацию воздуха и образование облаков. Как известно, атмосфера — это открытая система, которая находится внутри магнитосферы и непрерывно взаимодействует с поверхностью Земли (континенты, моря и океаны) и обменивается энергией с другими (внешними) оболочками. При этом она подвергает-

ся также воздействию постоянных физических факторов (солнечное излучение, космические лучи, космическая пыль, метеориты и т. п.). Солнечная энергия определяет скорость парообразования в атмосфере, а космические лучи отвечают за образование центров конденсации. Важно подчеркнуть, что при этом космические лучи являются основным источником ионизации атмосферы на высотах образования облаков. Под действием ионизации воздуха от космических лучей происходит конденсация пара и образование облаков в соответствующих слоях атмосферы. Образование облаков регулирует альбедо атмосферы, т.е. поступление солнечной энергии к поверхности Земли. Таким образом, процесс происходит по схеме «двухкаскадного усилителя».

Поток энергии ГКЛ на орбите Земли составляет  $0.1 \text{ нВт/см}^2$ ; поток энергии типичного тропосферного возмущения может достигать значений  $1 \text{ мВт/см}^2$ . Отсюда следует, что коэффициент усиления в таком триггерном механизме должен быть огромным и оставаться на уровне около  $10^7$  на протяжении интервала 1 сут или менее [21]. Разумеется, эта упрощённая схема не учитывает многих важных звеньев, например роль электрических полей и ледяных кристаллов. С другой стороны, надёжно установлено, что в ускоренном росте дождевых капель основная роль принадлежит отрицательным зарядам (ионам). В свою очередь, это является, по-видимому, причиной грозовой активности и отрицательного заряда земной поверхности. В работе [4] обращается внимание на тот факт, что поток солнечной энергии максимален вблизи экватора, тогда как поток ГКЛ минимален на экваторе и максимален в полярных шапках Земли, на широтах выше  $\pm 60^\circ$ . Это должно способствовать возникновению или усилению меридиональной циркуляции атмосферы. Для понимания механизмов солнечно-атмосферных связей очень полезными оказались солнечные космические лучи [18]. Они служат своеобразным зондом в изучении таких явлений, как истощение озонового слоя, возмущения в глобальной цепи атмосферного электричества, вариации параметров шумановских резонансов, изменение прозрачности ат-

мосферы и её завихрённости, образование космогенных изотопов и нитратов и др.

### МАГНИТО-БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

До последнего времени в гелиобиофизических исследованиях для обработки и анализа наблюдений использовался математический аппарат, основанный на простейших статистических моделях. В таких моделях обычно не учитывается многофакторный характер проблемы, т. е. большая вероятность одновременного воздействия гелиогеомагнитных, метеорологических, социальных и других факторов. Не учитываются также нестационарность некоторых процессов, например, эффект блуждания фазы гелиогеофизических и биологических ритмов. При изучении МБЭ особую трудность представляет его нелинейность, например наличие биотропных амплитудно-частотных окон воздействия ЭМП.

Следует отметить, что в солнечно-земной физике в целом для изучения гелиогеофизических рядов данных уже давно применяются такие мощные современные методы, как вэйвлет-анализ, нейронные сети, распознавание образов. Однако гелиобиофизика (гелиобиология) до настоящего времени подобные подходы игнорировала. В работе [9] критически рассмотрена применимость этих методов к задачам гелиобиологии и показана их ограниченность. Было получено заключение, что при изучении МБЭ необходимо использовать современные методы ситуационного анализа. Одна из частных задач сводилась к выявлению биотропных областей для соответствующих характеристик космической и земной погоды с помощью методов распознавания образов. При этом исследователи опирались на концепцию линейной оболочки [10], являющуюся логическим продолжением и развитием методики сингулярного спектрального анализа.

Такой подход позволил получить корректные результаты в условиях сильного перекрывания выпуклых оболочек, построенных по данным о заболеваемости инфарктом миокарда и температуры/давления атмосферы (статистика по Москве за 1992—2005 гг.). Как выяснилось, быстрые скачки  $K_p$ -индекса, связанные с магнитными

бурями, обладают существенной биотропностью (18.05 %) в отношении острого инфаркта миокарда и острых нарушений мозгового кровообращения. Что касается больных гипертонической болезнью (ГБ), то удалось показать, что оба фактора — магнитное возмущение ( $K_p$ ) и колебания атмосферного давления ( $P_a$ ) — действуют одновременно, но их относительный вклад в это воздействие выражается соотношением 5 : 4. Не вызывает сомнения, что разработанные подходы [9] могут быть использованы для автоматического контроля влияния космической и земной погоды на человека в системах прогноза, основанных на спутниковой информации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами конспективно дана наиболее существенная, на наш взгляд, информация о последних достижениях и нерешённых задачах в очень перспективной области космофизики — проблеме «Солнце — Земля». Главные цели междисциплинарных исследований в этой области на сегодняшний день — это определение парциальных воздействий солнечной и геомагнитной изменчивости на окружающее Землю пространство (на различных уровнях) и корректная оценка относительного вклада отдельных факторов в очень разнообразные явления и многочисленные эффекты СЗС. При построении физических механизмов во многих случаях необходимо учитывать резонансный характер явлений (гелио-геофизическая ритмика, биоритмология). Последние два направления важны, несомненно, не только для солнечно-земной физики, но и для решения некоторых глобальных гносеологических проблем [3, 8]: «биологические часы», наше место и роль во Вселенной...

В заключение заметим, что полная библиография по различным аспектам СЗС насчитывает тысячи публикаций, так что приведенные ниже ссылки дают лишь начальную нить для более подробного поиска.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 07-02-01405, 08-02-92208, 09-02-98511), Программой фундаментальных исследований Президиума РАН (ОФН-VI.15) и грантами Президента*

*Российской Федерации (НШ-8499.2006.2, НШ-4573.2008.2).*

1. Акасофу С., Чепмен С. Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1974—1975. — Т. 1—2.
2. Владимирский Б. М., Темуриянц Н. А. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. — М.: МНЭПУ, 2000. — 374 с.
3. Владимирский Б. М., Темуриянц Н. А., Мартынюк В. С. Космическая погода и наша жизнь. — Фрязино: Век 2, 2004. — 230 с.
4. Крымский Г. Ф. Космические лучи и околоземное окружение // Солнечно-земная физика. — Иркутск, 2002. — № 2. — С. 42—45.
5. Крымский Г. Ф., Матвиенко Г. Г., Пенин С. Т., Колосов В. В. Влияние ионизации на облакообразование // Современные проблемы космической физики. — Якутск: ИКФИА, 2008. — С. 137—140.
6. Мигулин В. В., Мирошниченко Л. И., Обридко В. Н. Солнечно-земная физика: Проблемы и перспективы // Вестник АН СССР. — 1987. — № 10. — С. 83—89.
7. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля. — М.: Наука, 1981. — 144 с.
8. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 2011.
9. Ожередов В. А., Бреус Т. К. Новые подходы к статистическому анализу рядов длительных наблюдений гелио-геомагнитной активности и медико-биологических показателей, реагирующих на нее // Геофизические процессы и биосфера. — 2008. — 7, № 1. — С. 27—32.
10. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. — М.: Физматлит, 2004. — 400 с.
11. Хабарова О. В., Руденчик Е. А. Геоэффективность изменений плотности солнечного ветра. Основы новой методики прогноза магнитных бурь // Актуальные проблемы физики солнечной и звёздной активности. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003. — Т. 2. — С. 520—523.
12. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1973. — 350 с.
13. Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Revs. — 1981. — 28. — P. 121—190.
14. Aoki T. On the validity of Akasofu's  $\epsilon$  parameter and of the Vasyliunas et al. general formula for the rate of solar wind-magnetosphere energy input // Earth Planets Space. — 2005. — 57. — P. 131—137.
15. Emmert J. T., Lean J. L., Picone J. M. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum // Geophys. Res. Lett. — 2010. — 37. — P. L12102.

16. *Kirkby J.* Cosmic rays and climate presentation. — CERN Colloquium, 4 June 2009.
17. *Labitzke K., van Loon H.* Connection between the troposphere and stratosphere on a decadal scale // *Tellus A.* — 1995. — **47**. — P. 275—286.
18. *Miroshnichenko L. I.* Solar cosmic rays in the system of solar-terrestrial relations (review) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* — 2008. — **70**. — P. 450—466.—(Special Issue of ISROSES Proceedings).
19. *Østgaard N., Germany G., Stadsnes J., Vondrak R. R.* Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107A**, N 9. — P. 1233. — SMP 9.1-9.14.
20. *Solomon S. C., Woods T. N., Didkovsky L.V., et al.* Anomalously low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum // *Geophys. Res. Lett.* — 2010. — **37**. — L16103. — P. 1—5.
21. *Tinsley B. A., Deen G. W.* Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercold water in high-level clouds? // *J. Geophys. Res.* — 1991. — **96D**, N 12. — P. 22283—22296.

*Надійшла до редакції 17.12.10*

*L. I. Miroshnichenko*

#### THE SUN – EARTH PROBLEM: MODERN CONCEPTS AND PHYSICAL MECHANISMS

We present a brief review of modern concepts for the Sun – Earth problem and proposed physical mechanisms of solar-

terrestrial relations (STR). This field covers a wide range of fundamental and applied problems of paramount importance (space weather, radiation hazard in space, operation of spaceborne and ground-based technological systems, heliobiology, etc.). Besides, it is closely connected with some general gnosiological problems (Weltanschauung). State-of-the-art information on existing problems is given and different channels for extraterrestrial influences are discussed at the up-to-date level: electromagnetic waves and fields, total solar irradiance, solar wind, energetic solar particles, galactic cosmic rays, cosmic dust, etc. Some of well-known and suggested STR effects and corresponding physical mechanisms are illustrated by several examples. In particular, we consider a number of different external «signals» in observed changes of terrestrial climate and weather. Especially, we analyse an expected impact of geophysical disturbances on the accuracy of some precise physical measurements and experiments. Due attention is paid to the heliobiological aspects of STR. Specifically, it is emphasized the multifactor nature of magneto-biological effect (MBE), its non-stationary and non-linear behaviour. We discuss the main features of different physical mechanisms (electromagnetic fields, ionising radiation, triggers, rhythmic and resonances in solar-terrestrial systems) and their applicability to the Sun – Earth problem. Most of them are still needed in more sophisticated theoretical development and experimental confirmation. The main goals of interdisciplinary studies in this field are to determine partial impacts of solar-geomagnetic variability on the terrestrial environments and to estimate (separate) relative contributions of different factors into various STR phenomena.

УДК 523.9-377

**В. Н. Криводубский<sup>1</sup>, О. К. Черемных<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ<sup>2</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ**О ЗАТЯНУВШЕМСЯ ВО ВРЕМЕНИ 23-м СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ**

*В рамках моделі  $\alpha\Omega$ -динамо запропоновано пояснення подовженої тривалості 23-го сонячного циклу, яка становила близько 13 років. Ми взяли до уваги новітні спостережені дані щодо суттєвого зростання річного модуля магнітних полів сонячних плям  $B_{sp}$  і розраховане нами магнітне пригнічення  $\alpha$ -ефекту, пов'язане з цим фактом. Період сонячного циклу в моделі  $\alpha\Omega$ -динамо визначається виразом  $T \approx 2\pi / \{ (1/2) |\alpha \partial\Omega / \partial r| \}^{1/2}$ , де  $\alpha$  — параметр спіральності турбулентних пульсацій, а  $\partial\Omega / \partial r$  — радіальний градієнт кутової швидкості в конвективній зоні Сонця. В нелінійному режимі вплив магнітного поля  $B$  на  $\alpha$ -ефект описується виразом  $\alpha(B) = \alpha_0 \Psi_\alpha(B)$ , де  $\alpha_0$  — «немагнітне» значення  $\alpha$ -параметра, а  $\Psi_\alpha(B) \propto B^{-3}$  — квенчінг-функція. Із наземних спостережень відомо, що середні величини магнітного поля сонячних плям великих розмірів  $B_{sp}$  в першій половині 23-го циклу були значно вищими (приблизно на 13 %), ніж в останніх трьох циклах. Через це значення функції магнітного насичення  $\Psi_\alpha(B_{sp})$  в максимумі 23-го циклу зменшилися і складало близько 70 % від її значення у мінімумі циклу. Це означає, що  $\alpha$ -параметр був магнітно пригніченим тією ж мірою. В результаті розрахований динамо-період 23-го циклу мусить збільшитися в 1.2 рази і становити близько 13 років.*

**ВСТУПЛЕНИЕ**

Как известно, продолжительность 23-го цикла солнечной активности составила около 13 лет, что заметно превысило средний период циклов 11 лет [6, 17]. Солнце преподнесло сюрприз гелиофизикам, которые прогнозировали эпоху минимума 23-го цикла в 2007 г. (рис. 1).

В действительности же новый 24-й цикл начался только в середине 2009 г. [6, 14] (см. также <http://www.swpc.noaa.gov/Solar Cycle>). Поэтому возникает необходимость объяснения затянувшейся продолжительности периода 23-го цикла.

**МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО-ЦИКЛА**

Общеизвестно, что последовательные циклы солнечной активности немного отличаются друг от друга по амплитуде, продолжительности и другим характеристикам. Объяснение этих различий обычно состоит в том, что основные характеристики цикла зависят от глобальных параметров, управляющих циклом. Случайные кратковременные и даже незначительные флуктуации управляющих параметров могут объяс-

нить наблюдаемые вариации и аномалии солнечных циклов. Согласно современным представлениям физическая природа солнечного цикла состоит в распространении квазипериодических волн магнитного поля, возбуждаемых механизмом  $\alpha\Omega$ -динамо в нижней части солнечной конвективной зоны (СКЗ) [1].

В рамках этого подхода дифференциальное вращение Солнца генерирует тороидальное магнитное поле из полоидального ( $\Omega$ -эффект). В свою очередь, спиральные турбулентные (конвективные) пульсации, действуя на тороидальное поле, регенерируют новое полоидальное поле, направленное противоположно его исходному направлению в предыдущем цикле ( $\alpha$ -эффект) [1]. В такой способ происходит замыкание в солнечном цикле цепи самовозбуждения глобального магнитного поля, состоящего из полоидального и тороидального компонентов. В результате возникает распространяющаяся вдоль меридианов волна тороидального поля (т. н. динамо-волна). Направление миграции динамо-волны зависит от знака произведения параметров  $\alpha$  и  $\partial\Omega / \partial r$ , управляющих циклом. Время распространения динамо-волны, играющее роль периода динамо-цикла солнечной ак-

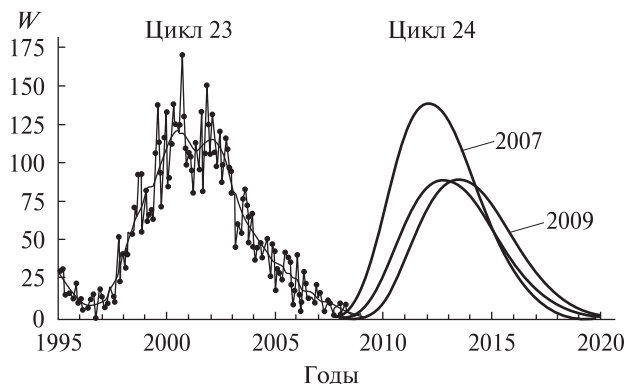


Рис. 1. Числа Вольфа  $W$ : наблюдения в 23-м цикле и прогнозы 24-го цикла, сделанные в 2007 и 2009 гг. [17]

тивности, определяется выражением

$$T \approx 2\pi / \{ (1/2) |\alpha \partial\Omega / \partial r| \}^{1/2},$$

где  $\alpha \approx -\frac{\tau}{3} \langle \mathbf{v} \cdot \text{rot } \mathbf{v} \rangle \approx -\frac{2}{3} \Omega l^2 \left( \frac{\nabla \rho}{\rho} + \frac{\nabla v}{v} \right)$  — параметр

спиральности турбулизованных конвективных движений в СКЗ,  $\mathbf{v}$  — вектор поля турбулентных скоростей,  $\tau$ ,  $l$  и  $v$  — соответственно характерные время, масштаб и средняя квадратичная скорость  $v = \langle \mathbf{v}^2 \rangle^{1/2}$  турбулентных пульсаций,  $\rho$  — плотность солнечной плазмы, угловые скобки обозначают операцию усреднения по пространственным или временным промежуткам, значительно превышающим соответствующие масштабы турбулентности,  $\partial\Omega / \partial r$  — радиальный градиент угловой скорости. Важно подчеркнуть, что возрастание тороидального магнитного поля  $B$ , ответственного за появление пятен на солнечной поверхности, в нелинейном режиме приводит к насыщению параметра  $\alpha$ . Условие магнитного насыщения  $\alpha$ -эффекта описывается уравнением  $\alpha(\beta) = \alpha_0 \Psi_\alpha(\beta)$  [15], где  $\alpha_0$  — «немагнитное» значение параметра спиральности,  $\beta = B / B_{eq}$  — параметр нормированного магнитного поля,  $B_{eq} \approx v (4\pi\rho)^{1/2}$  — равномерно распределенное магнитное поле, возбуждаемое мелкомасштабными турбулентными пульсациями со скоростью  $v$ , а  $\Psi_\alpha(\beta)$  — нормированная на единицу функция магнитного насыщения  $\alpha$ -эффекта (т. н. квенчинг-функция [15]). При сильных магнитных полях квенчинг-функция становится пропорциональной величине  $\beta^{-3}$ . Ранее нами было показа-

но [4, 10], что период динамо-волны близок к 11 годам. При расчетах периода  $T$  значение параметра  $\partial\Omega / \partial r \approx 3.3 \cdot 10^{-18}$  рад/с·см было оценено на основании данных последних гелиосейсмологических экспериментов [9], а при оценке параметра  $\alpha(\beta) \approx 2$  м/с [10] были использованы физические характеристики подфотосферных плазменных слоев из модели СКЗ Стикса [16]. Необходимое для расчета квенчинг-функции  $\Psi_\alpha(\beta)$  значение установившегося тороидального поля было определено из условия баланса двух конкурирующих эффектов, вызывающих радиальный перенос крупномасштабного горизонтального поля в СКЗ: направленной вверх магнитной плавучести Паркера и направленного вниз макроскопического диамагнитного вытеснения поля [1]. На глубинах наиболее эффективного  $\alpha$ -возбуждения (160–180 тыс. км) величина рассчитанного стационарного тороидального поля  $B$  составила 0.20–0.24 Тл [10]. Более сильные магнитные поля компенсировали диамагнитный перенос вниз и, всплывая на поверхность Солнца, порождали наблюдаемые пятна. Связанные с величиной  $B$  другие параметры, важные для анализа эволюции динамоцикла, в наших расчетах [10] были такими:  $\beta \approx 0.8$ ;  $\Psi_\alpha(\beta) \approx 0.3 \dots 0.4$ .

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ. ВОЗРАСТАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В 23-м ЦИКЛЕ

Как уже отмечалось, длительность 23-го цикла оказалась большей, чем 11 лет. Объяснить эту аномалию цикла можно, на наш взгляд, привлекая последние результаты работы [5], касающиеся заметного возрастания величины модуля магнитных полей солнечных пятен в течение первой половины 23-го цикла. В работе [5] были обработаны данные наземных спектральных наблюдений пятен в Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Крымской астрофизической обсерватории, Астрономической обсерватории Уральского университета и обсерватории Маунт Вилсон. Анализировались больше 2000 визуальных измерений магнитных полей больших по размерам пятен (диаметром 30–60°)



на фазах подъема и максимума 23-го цикла (с 1996 по 2004 год). Обнаружено возрастание значений межгодовых вариаций модуля магнитных полей пятен, которое было названо индексом  $B_{sp}$  [5]. За период исследований величина  $B_{sp}$  увеличилась от 0.24 до 0.27 Тл (рис. 2), т. е. на 13 %. Одновременно был определен индекс средних максимальных магнитных индукций групп пятен  $B_{max}$ , введенный ранее Ю. И. Витинским [2]. В расчетах указанного индекса были использованы данные измерений обсерватории Маунт Вилсон. Полученные в работе [5] результаты, на наш взгляд, ставят под сомнение утверждения некоторых исследователей о том, что 23-й цикл солнечной активности был магнитно-слабым [7, 12, 13].

Обращаем внимание на существенный наблюдательный аспект, отчетливо заметный на рис. 2. Он состоит в том, что при монотонном временном возрастании индекса больших пятен  $B_{sp}$  имели место кратковременные магнитные флуктуации с характерным периодом один год (чередующиеся уменьшение и увеличение поля на 5 мТл (приблизительно на 2 %)).

Отметим, наконец, еще один важный наблюдательный факт. Согласно данным, приведенным в обзоре [6], величина магнитного поля на полюсах Солнца в конце 23-го цикла было на 40 % ниже, чем в предыдущем цикле.

#### АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Мы считаем, что обнаруженное наблюдениями возрастание во времени модуля магнитных полей пятен на фазе роста 23-го цикла [5] может объяснить его аномальную продолжительность в рамках динамо-модели. Приведем для этого некоторые оценки. В соответствии с данными наблюдений [5] о росте модуля магнитных полей пятен  $B_{sp}$  в максимуме 23-го цикла, параметр  $\beta_{sp} \approx B_{sp} / B_{eq}$  увеличился примерно в 1.13 раз (по сравнению с его значением в эпоху минимума этого цикла). Поэтому квенчинг-функция должна уменьшиться в 1.44 раз, поскольку, как отмечалось выше, в случае сильных полей она пропорциональна величине  $\beta_{sp}^{-3}$ . Следовательно, в максимуме 23-го цикла величина функции насыщения составила около 70 % ее значе-

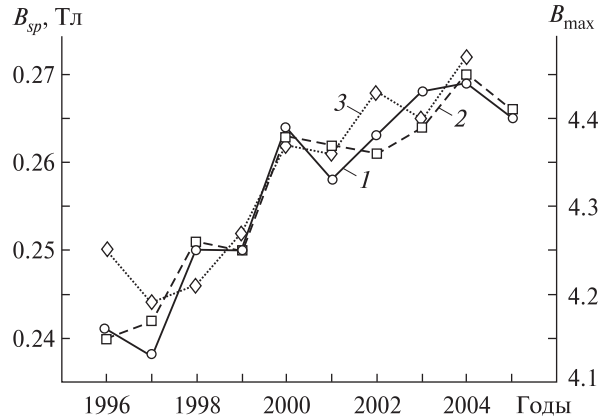


Рис. 2. Рост магнитного поля солнечных пятен больших размеров (диаметром 30–60 см) в 23-м цикле [5]: кривая 1 — среднегодичное значение  $B_{sp}$  модуля магнитной индукции пятен, полученное как средневзвешенное величины всего массива годичных измерений четырех обсерваторий; 2 — то же, но значения  $B_{sp}$  получены усреднением по данным наблюдений обсерваторий без учета количества измерений на каждой из них; 3 — индекс среднегодичной максимальной ежедневной магнитной индукции  $B_{max}$  групп солнечных пятен, введенный ранее Ю. И. Витинским [2] (значения  $B_{max}$  приведены в баллах: балл 1 соответствует 0...50 мТл, 2 — 60...100 мТл, 3 — 110...150 мТл, 4 — 160...200 мТл, 5 — 210...250 мТл)

ния (0.3...0.4) в минимуме цикла:  $\Psi_{\alpha}^{23max}(\beta_{sp}) \approx 0.7 \Psi_{\alpha}^{23min}(\beta_{sp}) \approx 0.2...0.3$ . Последнее, в свою очередь, привело к уменьшению параметра спиральности  $\alpha^{23max}(\beta_{sp}) = \alpha_0 \Psi_{\alpha}^{23max}(\beta_{sp}) \approx 140$  см/с (в минимуме цикла было:  $\alpha^{23min}(\beta_{sp}) \approx 200$  см/с). Из проведенных оценок следует, что длительность динамо-цикла  $T$ , пропорциональная  $\alpha^{-1/2}$ , должна увеличиться в  $[0.7]^{-1/2} \approx 1.2$  раз. Поэтому в результате расчетов получаем, что для 23-го цикла продолжительность динамо-периода составляет около 13 лет.

Несколько слов о полярных магнитных полях. Как известно из наблюдений, полярное поле достигает своего максимального значения ближе к концу текущего цикла. В рамках динамо-модели его величина обуславливается интенсивностью  $\alpha$ -эффекта, генерирующего полоидальный компонент глобального поля. Выявленное нашими расчетами уменьшение параметра  $\alpha$ -эффекта (приблизительно в 1.44 раз) должно вызвать соответствующее ослабление возбуждаемого им полоидального поля. Именно такое уменьшение

полярного магнитного поля в конце 23-го цикла (приблизительно на 40 %) отмечено в обзоре [6].

Теперь остановимся на возможных причинах возрастания во времени магнитных полей крупных пятен, обнаруженного наблюдениями [5]. На наш взгляд, эти изменения связаны с временными вариациями угловой скорости в области наиболее эффективной генерации тороидального поля в окрестности тахоклина (слоя возле дна СКЗ, в котором происходит резкий переход от широтного дифференциального вращения к почти жесткому вращению лучистой зоны). В пользу этого предположения свидетельствуют данные гелиосейсмологических экспериментов в эпоху минимума и на фазе роста 23-го цикла активности (в период с 1995 по 2006 год), полученные двумя группами исследователей [8, 9]. Суть проведенных измерений состояла в непрерывных наблюдениях поля доплеровских скоростей, охватывающих весь солнечный диск. Первая группа проводила наземные наблюдения в рамках проекта наземной сети шести обсерваторий Global Oscillation Network Group (GONG), а вторая — с помощью инструмента Michelson Doppler Imager (MDI), установленного на борту космической станции SOHO. Путем решения обратной задачи вращательного расщепления частот акустических и гравитационных глобальных колебаний наблюдаемых на поверхности Солнца были выявлены в окрестности тахоклина заметные временные вариации (флуктуации) угловой скорости относительно ее усредненных значений  $\Omega$  за 11 лет [8, 9]. Было установлено, что вблизи экваториальной плоскости на расстоянии  $r \approx 0.72R$  от центра Солнца ( $R$  — радиус Солнца), амплитуда вариаций частоты остаточной угловой скорости  $\delta\Omega/2\pi$  с периодом около 1.3 года достигала 6 нГц (или  $\approx 1.5\%$ ). В то же время на высоких широтах период колебаний составлял приблизительно один год, а их размах увеличился до 2 нГц ( $\approx 2\%$ ). Чрезвычайно важно, что обнаруженные в этих гелиосейсмологических экспериментах вариации угловой скорости хорошо коррелируют с временными (с периодом один год) и амплитудными ( $\approx 2\%$ ) флуктуациями величины магнитных полей пятен на поверхности Солнца [5]. В рамках модели

динамо-цикла градиент угловой скорости обуславливает интенсивность тороидального поля ( $\Omega$ -эффект). Благодаря магнитной плавучести тороидальное поле определяет, в свою очередь, величину магнитных полей пятен. Таким образом, если опираться на результаты гелиосейсмологических экспериментов, то можно объяснить причины наблюдаемых флуктуаций величины магнитных полей крупных пятен (с периодом один год) на фазе роста 23-го цикла. Остается еще не ясным эффект монотонного возрастания магнитных полей пятен в этот период. По-видимому, он обусловлен временным возрастанием угловой скорости. Это предположение можно будет проверить после получения новых результатов гелиосейсмологических экспериментов.

Возвращаемся снова к достоверно установленным наблюдаемым результатам [5, 6, 17]. Основные особенности 23-го цикла состоят в том, что его продолжительность увеличилась, мощность магнитных полей крупных пятен возросла, а полярное поле ослабло. Временные особенности поведения магнитных полей на солнечной поверхности дали основания некоторым исследователям [7, 12, 13] заявить, что 23-й цикл был магнитно-слабым. Причина такого вывода может быть связанной с тем, что при анализе наблюдательных данных эти исследователи, по-видимому, не разделяли крупномасштабные поля пятен в «королевской зоне» и их маломасштабные слабые «магнитные сателлиты» — поры, а также учитывали слабые полярные поля. А это имеет принципиальное значение при определении «магнитной мощности» цикла и при расчетах относительного числа солнечных пятен (чисел Вольфа). Действительно, если опираться на числа Вольфа, при расчете которых учитываются маленькие пятна, поры и слабые полярные поля, то 23-й цикл формально можно считать слабым по сравнению с предыдущими двумя циклами [14]. Вместе с тем, если принимать во внимание только пятна больших размеров [5], порожденные всплывающими сильными подфотосферными магнитными полями, то все выглядит наоборот: первую половину 23-го цикла «в магнитном смысле» можно отнести к мощной стадии цикла. Поэтому, на наш взгляд, бо-

лее адекватным может быть такой вывод: первая половина 23-го цикла была магнитно-сильной, тогда как конечную стадию активности цикла после 2006 г. действительно можно считать магнитно-слабой.

В новейшей работе [3] на основе нелинейной модели динамо показано, что временные флуктуации параметра спиральности  $\alpha$  (обусловленные магнитным подавлением сильных полей) могут приводить к переходам между двумя возможными режимами солнечных циклов: сильные стабильные динамо-циклы относительно большой амплитуды и затухающие колебания малой амплитуды (т. н. явление гистерезисов динамо-циклов). При достаточно малых значениях динамо-числа, которое пропорционально величине параметра  $\alpha$ , режим динамо «выключается» и устанавливается режим затухающих слабых колебаний магнитного поля. Такое поведение может служить моделью глобальных минимумов солнечной активности, подобных до минимума Маундера. Поэтому именно ослабленный  $\alpha$ -эффект в значительной степени несет ответственность за режим глобальных минимумов активности. Обнаруженная нашими теоретическими расчетами в рамках модели динамо на основании экспериментальных магнитных данных склонность параметра  $\alpha$  к уменьшению в 23-м цикле может свидетельствовать о том, что Солнце приближается к очередному глобальному минимуму активности.

Кратко остановимся на прогнозе 24-го цикла. Отмеченное в обзоре [6] уменьшение полярного магнитного поля в 23-го цикле в рамках динамо-модели должно отразиться на интенсивности тороидального поля в новом цикле: количество пятен и величина их магнитных полей должны уменьшиться. Поэтому наступающий 24-й цикл, по-видимому, будет слабым в «магнитном смысле». Вместе с тем уменьшение величины магнитных полей пятен после 2004 г. (см. рис. 2), порождаемых тороидальным полем, должна способствовать ослаблению магнитного  $\alpha$ -квенчинга (что ведет к увеличению коэффициента  $\alpha$ ). В таком случае рассчитанная продолжительность нового динамо-цикла, по-видимому, уменьшится по сравнению с 23-м циклом (поскольку

управляющий циклом параметр  $\alpha$  увеличился), и будет соответствовать среднестатистической длительности циклов. Коррективы в наши прогнозы могут внести новые гелиосейсмологические эксперименты относительно вариаций глубинного дифференциального вращения. Ведь радиальный градиент угловой скорости также служит управляющим параметром динамо-цикла. Следует помнить, что  $\Omega$ -эффект есть более сильный эффект по сравнению со слабым и чувствительным  $\alpha$ -эффектом.

## ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенный в рамках динамо-модели анализ магнитной активности Солнца позволяет предположить, что обнаруженное наземными телескопическими наблюдениями возрастание магнитных полей крупных пятен (приблизительно на 30 мТл) в первой половине 23-го цикла способствовало магнитному подавлению (уменьшению) величины параметра  $\alpha$ -эффекта примерно на 30 %. И поскольку длительность динамо-цикла обратна величине параметра спиральности ( $T \propto \alpha^{-1/2}$ ), то при уменьшении коэффициента  $\alpha$  период динамо-цикла должен увеличиваться. Действительно, рассчитанная нами продолжительность динамо-цикла с учетом магнитного насыщения  $\alpha$ -параметра увеличилась приблизительно в 1.2 раза, по сравнению со среднестатистическим значением солнечных циклов (11 лет), и составила 13 лет [11].

Вместе с тем при монотонном возрастании магнитного поля крупных пятен в наблюдениях фиксировались временные флуктуации величины модуля полей с периодом один год. Причина этих магнитных флуктуаций в рамках динамо-модели может быть обусловлена вариациями угловой скорости вращения Солнца вблизи тахоклина (с периодом 1...1.3 года), обнаруженными в гелиосейсмологических экспериментах [8, 9].

Магнитное подавление  $\alpha$ -эффекта, вызванное возрастанием тороидального поля в первой половине 23-го цикла (см. рис. 2), обусловило существенное уменьшение величины полоидального компонента глобального поля, что привело в конце динамо-цикла к ослаблению наблюдаемых полярных полей. Это, в свою очередь, долж-

но отразиться на интенсивности тороидального поля в новом динамо-цикле: количество пятен и величина их магнитных полей должны уменьшиться. Вместе с тем продолжительность нового динамо-цикла может уменьшиться (поскольку увеличилась величина управляющегося параметр  $\alpha$ ). На основе данных наблюдений магнитных полей в конце 23-го цикла мы прогнозируем, что в рамках динамо-модели наступающий 24-й цикл, очевидно, будет относительно слабым в «магнитном смысле», а его продолжительность должна быть близкой к среднестатистической длительности циклов. Коррективы в наш прогноз могут внести новые гелиосейсмологические эксперименты, касающиеся текущего глубинно-го дифференциального вращения.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта Ф25.2/094 Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины.*

1. Вайнштейн С. И., Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А. Турбулентное динамо в астрофизике. — М., 1980. — 354 с.
2. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. — Ленинград: Наука, 1973. — 258 с.
3. Кичатинов Л. Л., Олемской С. В. Гистерезис в динамо и глобальные минимумы солнечной активности // Письма в Астрон. журн. — 2010. — **36**, № 4. — С. 304—309.
4. Криводубский В. Н. Про динамо-період сонячного циклу // Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Астрономія. — 2003. — № 39-40. — С. 10—13.
5. Лоцикая Н. И., Лямова Г. В., Малащук В. М. Сравнение результатов визуальных измерений магнитных полей крупных солнечных пятен, выполненных в разных обсерваториях в 23 цикле солнечной активности // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2007. — **103**, № 4. — С. 59—67.
6. Обридо В. Н. Введение. Циклы активности на Солнце и некоторые особенности 23 цикла // Циклы активности на Солнце и звездах. — М., 2009. — С. 9—18.
7. Ataç T., Özgüç A. Overview of the solar activity during solar cycle 23 // Solar Phys. — 2006. — **233**. — P. 139—153.
8. Howe R. Seismic results on temporal variation of the solar rotation // Proc. of SOHO 18/GONG 2006/HELASI, Beyond the spherical Sun (ESA SP-624). 7—11 August Sheffield, UK / Eds K. Fletcher, M. Thompson. — Publ. on CD-ROM, 2006. — P. 6.1.
9. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Dynamic variations at the base of the solar convection zone // Science. — 2000. — **287**. — P. 2456—2461.
10. Krivodubskij V. N. Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone // Astron. Nachr. — 2005. — **326**, N 1. — P. 61—74.
11. Krivodubskij V. On the apparent mystery of 23rd solar cycle period // IAU Symp. 273 «Physics of Sun and Star Spots», Ventura, California, USA, 23—26 August, 2010. — Ventura, 2010. — P. 44—45. — (Poster Abstracts-0046).
12. Livingston W. Sunspots observed to physically weaken in 2000—2001 // Solar Phys. — 2002. — **207**. — P. 41—45.
13. Livingston W., Penn M. Are sunspots different during this solar minimum? // EOS, Trans. Amer. Geophys. Union. — 2009. — **90**, N 30. — P. 257.
14. Pishkalo M. I. Prediction of amplitude of solar cycle 24 based on polar magnetic field of the Sun at cycle minimum // Sun and Geosphere. — 2010. — **5**, N 2.
15. Rüdiger G., Kitchatinov L. L. Alpha-effect and alpha-quenching // Astron. and Astrophys. — 1993. — **269**. — P. 581—588.
16. Stix M. The Sun. — Berlin—Heidelberg—New York, 1989. — 200 p.
17. Zimmerman R. What's wrong with our Sun? // Sky and Telescope. — 2009. — **118**, N 2. — P. 26—29.

Надійшла до редакції 17.12.10

V. N. Krivodubskij, O. K. Cheremnykh

#### ON THE EXTENDED 23RD SOLAR CYCLE

An explanation of the mystery of the extended 23rd solar cycle duration about 13 years in the frame of  $\alpha\Omega$ -dynamo model is proposed. We took into account up-to-date observed data on the essential increase of averaged annual module of magnetic fields of large-scale sunspots  $B_{sp}$  as well as the magnetic quenching for the  $\alpha$ -effect which is connected with the observed fact and calculated by us. The period of a solar cycle in  $\alpha\Omega$ -dynamo model is defined by the expression  $T \approx 2\pi / \{ (1/2) |\alpha \partial\Omega / \partial r| \}^{1/2}$ , where  $\alpha$  is the helicity parameter of turbulent pulsations, and  $\partial\Omega / \partial r$  is the radial gradient of the angular velocity in the convection zone of the Sun. The magnetic back reaction of the magnetic field  $B$  on the  $\alpha$ -effect in the non-linear regime is described by the equation  $\alpha(B) = \alpha_0 \Psi_\alpha(B)$ , where  $\alpha_0$  is the «nonmagnetic» value of the  $\alpha$ -parameter, and  $\Psi_\alpha(B) \sim B^{-3}$  is the decreasing (quenching) function. Ground-based observations testify that the average values of the magnetic field for large-scale sunspots  $B_{sp}$  during the first half of the 23rd cycle were really higher (about 13 %) than during three last cycles. As a result of this, the value of the magnetic quenching-function  $\Psi_\alpha(B_{sp})$  in the 23rd cycle maximum was equal to about 70 percent of quenching-function value in the cycle minimum. This means that the  $\alpha$ -parameter was magnetically quenched just in the same degree. Therefore, the calculated 23rd cycle dynamo-period is bound to increase by a factor of 1.2 and to be about 13 years.

УДК 523.9

А. А. Логинов<sup>1</sup>, Н. Н. Сальников<sup>1</sup>, О. К. Черемных<sup>1</sup>, В. Н. Криводубский<sup>2</sup>, Н. В. Маслова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

<sup>2</sup>Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЛОИДАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ СОЛНЦА

*Запропоновано напівемпіричну гідродинамічну модель генерації глобальної полоїдальної течії Сонця, обумовленої його диференціальним обертанням. Знайдено просторові моди та інкременти нестійкої полоїдальної течії.*

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных проблем солнечной физики является вопрос о происхождении и пространственно-временных вариациях магнитной активности Солнца. Главными периодами временных вариаций солнечной активности служат периоды в 11 лет (по числам Вольфа) и 22 года (магнитный цикл Хэйла) [7], которые носят колебательный циклический характер. Наибольшего распространения среди исследователей Солнца получили представления, что задающим механизмом солнечных циклов служат динамо-процессы усиления первоначально слабого магнитного поля движениями проводящей среды с положительной обратной связью, приводящей к самоподдержанию или дальнейшему росту поля. Кинетической энергии гидродинамических движений на Солнце, как правило, достаточно для усиления поля. Представления о том, что солнечные магнитные поля генерируются в результате динамо-процессов, получили наибольшее распространение [2], хотя продолжают исследоваться и в других направлениях. Роль «динамо-машины» на Солнце играет конвективная зона, где поле скоростей естественно разделено на крупномасштабную (регулярную) тороидальную скорость  $\mathbf{V}$ , которая отвечает солнечному дифференциальному вращению [8]

(впервые на основании наблюдения перемещения пятен на солнечной поверхности на него обратил внимание еще в 1863 г. Кэррингтон [10]) и мелкомасштабную скорость  $\mathbf{v}$  из-за турбулентной конвекции, которая на поверхности проявляется в виде грануляции [3]. Со временем прояснилось, что полный вектор регулярного поля скоростей  $\mathbf{V}$ , кроме тороидального дифференциального вращения содержит также полоидальную циркуляцию [16]. Наблюдаемые на поверхности Солнца доплеровские смещения в спектральных линиях указывают на слабую крупномасштабную полоидальную циркуляцию солнечного вещества [16]. Во внешних приповерхностных слоях (до 15 % радиуса Солнца) это полоидальное течение направлено от экватора к полюсам [14, 15]. На средних широтах его амплитуда составляет всего  $\approx 5\text{--}10$  м/с, что значительно меньше, чем поверхностная регулярная скорость тороидального вращения (2 км/с) [1]. Исходя из закона сохранения вещества, исследователи пришли к выводу, что возле нижнего основания солнечной конвективной зоны (СКЗ) должно существовать полоидальное течение противоположного направления от полюсов к экватору. В таком случае вещество возле полюсов должно опускаться вниз, тогда как возле экватора оно должно подниматься к поверхности, чтобы таким образом обеспечить замкнутый цикл циркуляции вещества в СКЗ. Недавно было предложено несколько численных моделей солнечного динамо-цикла с учетом полоидаль-

ной циркуляции [13, 17]. Однако большинство исследователей достаточно осторожны относительно привлечения в модели динамо-цикла полоидальной циркуляции, поскольку пока нет общепринятой теоретической модели, которая бы объясняла направленное к экватору глубинное течение. Поэтому актуальная проблема полоидальной циркуляции на Солнце ждет своего дальнейшего решения, и именно этому вопросу посвящено наше исследование.

В первой работе авторов [5] была предложена и обоснована гидродинамическая модель генерации глобального полоидального течения на Солнце. В этой работе на основе данных гелиосейсмологии о дифференциальном вращении Солнца была найдена область, в которой тороидальное течение теряет устойчивость, что приводит к возникновению полоидального течения.

Для нахождения пространственного вида и эволюции во времени возникающего полоидального течения нами предлагается полуэмпирическая модель, входными параметрами которой являются данные гелиосейсмологии о дифференциальном вращении Солнца [18] и распределение плотности плазмы внутри Солнца согласно стандартной модели [11].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ ВИДА НЕУСТОЙЧИВОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОЛОИДАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИИ

Модель состоит из двух уравнений: уравнения динамики и уравнения неразрывности

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\text{grad}(P + U) + \eta \Delta \mathbf{V},$$

$$\text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

где  $P$  — давление,  $U$  — гравитационный потенциал,  $\eta$  — коэффициент вязкости. Предполагается, что скорости течения настолько медленные, что они не приводят к заметному изменению равновесных параметров Солнца. Уравнения будут записаны в сферической системе координат  $(R, \theta, \varphi)$ , в которой полярная ось направлена вдоль оси вращения Солнца. Предполагается независимость всех параметров и решений задачи от координаты  $\varphi$ . Решение задачи ищем в виде

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\varphi + \mathbf{v}, \quad |\mathbf{V}_\varphi| \gg |\mathbf{v}|, \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}_\varphi$  — скорость вращения Солнца, а  $\mathbf{v}$  — малая поправка, описывающая полоидальное течение. Это вполне соответствует наблюдательным данным об азимутальной и меридиональной скоростях Солнца. Так, скорость вращения экватора Солнца составляет 2000 м/с, а меридионального течения — около 10 м/с [1].

Подставляя (2) в уравнение неразрывности, получаем

$$\text{div}[\rho(\mathbf{V}_\varphi + \mathbf{v})] = \text{div}(\rho \mathbf{V}_\varphi \mathbf{e}_\varphi) + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (3)$$

Поскольку  $\mathbf{V}_\varphi = V_\varphi \mathbf{e}_\varphi$  не зависит от  $\varphi$ , то решение уравнения (3) будет иметь вид  $\rho \mathbf{v} = \text{rot} \mathbf{A}$ , где  $\mathbf{A} = A(R, \theta, t) \cdot \mathbf{e}_\varphi$ . Таким образом, гидродинамическая скорость солнечной среды  $\mathbf{v}$  ищется в виде

$$\mathbf{v} = \left\{ \frac{1}{\rho R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (A \sin \theta), -\frac{1}{\rho R} \frac{\partial}{\partial R} (RA), v_\varphi \right\}, \quad (4)$$

т. е. векторный потенциал  $\mathbf{A}$  полностью определяет полоидальную составляющую скорости  $\mathbf{v}_R$  и  $\mathbf{v}_\theta$ .

Подставим в первое уравнение системы (1) соотношение (2). Представив  $P$  и  $U$  в виде  $P = P_0 + p$  и  $U = U_0 + u$  и группируя члены уравнения по порядкам малости, получим с точностью до первого порядка включительно систему из двух уравнений:

$$\rho(\mathbf{V}_\varphi \cdot \nabla) \mathbf{V}_\varphi = -\text{grad}(P_0 + U_0),$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{V}_\varphi \cdot \nabla) \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{V}_\varphi \right] = -\text{grad}(p + u). \quad (5)$$

В системе (5) мы пренебрегли вязкостью, поскольку для солнечной плазмы отношение динамических сил к силам вязкости (число Тейлора) равно  $Ta = 4V_\varphi^2 R^2 / \eta^2 \approx 10^7$  [4]. В первом уравнении (5) нет производной по времени, поскольку мы считаем вращение Солнца стационарным. В дальнейшем мы будем полагать, что  $\mathbf{V}_\varphi$  является решением первого уравнения системы (5), а равенство между левой и правой частями уравнения обеспечивается за счет вариации гравитационного потенциала и давления, что сопряжено с изменением формы Солнца и его отличием от сферы. Поскольку Солнце является сфероидом со сплюснутостью порядка  $10^{-5}$ , то этого вполне

достаточно, чтобы уравновесить центробежную силу вращения, однако недостаточно для того, чтобы вносить какие-либо поправки в нашу модель.

Используя векторное уравнение

$$(\mathbf{V}_\varphi \cdot \nabla)\mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{V}_\varphi = \\ = \text{grad}(\mathbf{V}_\varphi \cdot \mathbf{v}) - \mathbf{V}_\varphi \times \text{rot} \mathbf{v} - \mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{V}_\varphi,$$

преобразуем второе уравнение системы (5) следующим образом:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \text{grad} \left( \frac{\mathbf{V}_\varphi \cdot \rho \mathbf{v}}{\rho} \right) - \rho \mathbf{V}_\varphi \times \text{rot} \frac{\rho \mathbf{v}}{\rho} - \rho \mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{V}_\varphi = \\ = -\text{grad}(p + u). \quad (6)$$

Подставляя в (6) вместо  $\mathbf{v}$  выражения (4) для его составляющих, получаем

$$\frac{\partial \text{rot} \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \mathbf{v}_\varphi}{\partial t} \mathbf{e}_\varphi + \rho \text{grad} \left( \frac{\mathbf{V}_\varphi \cdot \rho \mathbf{v}_\varphi}{\rho} \right) - \rho \mathbf{V}_\varphi \times \\ \times \text{rot} \left( \frac{\text{rot} \mathbf{A}}{\rho} + \frac{\rho \mathbf{v}_\varphi}{\rho} \mathbf{e}_\varphi \right) - \text{rot} \mathbf{A} \times \text{rot} \mathbf{V}_\varphi - \rho \mathbf{v}_\varphi \mathbf{e}_\varphi \times \text{rot} \mathbf{V}_\varphi = \\ = -\text{grad}(p + u). \quad (7)$$

Применяя к уравнению (7) операцию  $\text{rot}$  и вводя новое обозначение  $\mathbf{v}_\varphi^* = \rho \mathbf{v}_\varphi$ , получаем

$$\frac{\partial \text{rot}(\text{rot} \mathbf{A})}{\partial t} + \frac{\partial \text{rot}(\mathbf{v}_\varphi^* \mathbf{e}_\varphi)}{\partial t} + \text{rot} \left[ \rho \text{grad} \left( \frac{\mathbf{V}_\varphi \cdot \mathbf{v}_\varphi^*}{\rho} \right) \right] - \\ - \text{rot} \left[ \rho \mathbf{V}_\varphi \times \text{rot} \left( \frac{\text{rot} \mathbf{A}}{\rho} + \frac{\mathbf{v}_\varphi^* \mathbf{e}_\varphi}{\rho} \right) \right] - \text{rot}(\text{rot} \mathbf{A} \times \text{rot} \mathbf{V}_\varphi) - \\ - \text{rot}(\mathbf{v}_\varphi^* \mathbf{e}_\varphi \times \text{rot} \mathbf{V}_\varphi) = 0. \quad (8)$$

Записав векторное уравнение (8) в сферических координатах, окончательно получаем систему из двух уравнений:

$$\frac{\partial(\Delta \mathbf{A})_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \frac{\mathbf{V}_\varphi \cdot \partial(\mathbf{v}_\varphi^* \sin \theta)}{\sin \theta} \right] - \\ - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{\mathbf{V}_\varphi \cdot \partial(R \mathbf{v}_\varphi^*)}{R} \right] - \frac{1}{R^2} \frac{\partial(R \mathbf{V}_\varphi)}{\partial R} \frac{\partial \mathbf{v}_\varphi^*}{\partial \theta} - \\ - \frac{\mathbf{v}_\varphi^*}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial(\mathbf{V}_\varphi \sin \theta)}{\partial \theta} + \\ + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial(\mathbf{V}_\varphi \sin \theta)}{\partial \theta} \frac{\partial \mathbf{v}_\varphi^*}{\partial R} + \frac{\mathbf{v}_\varphi^* \text{ctg} \theta}{R^2} \frac{\partial(R \mathbf{V}_\varphi)}{\partial R} = 0, \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_\varphi^* = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{R^2 \sin \theta} \times$$

$$\times \left[ \frac{\partial}{\partial R} (R \tilde{\mathbf{A}}) \frac{\partial}{\partial \theta} (\mathbf{V}_\varphi \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial R} (R \mathbf{V}_\varphi) \frac{\partial}{\partial \theta} (\tilde{\mathbf{A}} \sin \theta) \right]. \quad (10)$$

Величины  $\tilde{\mathbf{A}}$ ,  $\tilde{\mathbf{v}}_\varphi^*$  и  $\gamma$  определены выражениями  $\mathbf{v}_\varphi^*(R, \theta, t) = \tilde{\mathbf{v}}_\varphi^*(R, \theta) e^{i t}$ ,  $\mathbf{A}(R, \theta, t) = \tilde{\mathbf{A}}(R, \theta) e^{i t} = \mathbf{e}_\varphi \tilde{\mathbf{A}}(R, \theta) e^{i t}$ , а  $(\Delta \tilde{\mathbf{A}})_\varphi$  —  $\varphi$ -я составляющая лапласиана вектора  $\tilde{\mathbf{A}}$ .

После подстановки  $\tilde{\mathbf{v}}_\varphi^*$  в (9) получается линейное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами, зависящими от  $R$  и  $\theta$ . Приближенное решение последнего ищем методом Галеркина в виде

$$\tilde{\mathbf{A}} = \sum_{k,l} \frac{C_{kl}}{\sqrt{R}} \times \\ \times \left[ \mathbf{J}_{(2k+1)/2}(\lambda_{kl}) \mathbf{J}_{-(2k+1)/2}(\lambda_{kl} R) - \right. \\ \left. - \mathbf{J}_{-(2k+1)/2}(\lambda_{kl}) \mathbf{J}_{(2k+1)/2}(\lambda_{kl} R) \right] \mathbf{P}_k^l(\cos \theta), \quad (11)$$

где  $\mathbf{J}_{\pm(2k+1)/2}(\lambda_{kl} R)$  — функции Бесселя первого рода полуцелого порядка, а  $\mathbf{P}_k^l(\cos \theta)$  — присоединенные полиномы Лежандра первого порядка. Граничные условия на дне тахоклина ( $R = 0.67$ ) и внешней поверхности Солнца ( $R = 1$ ) предполагают обращение в нуль радиальной составляющей скорости

$$\mathbf{v}_R = -\frac{1}{\rho R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tilde{\mathbf{A}} \sin \theta) = 0,$$

что позволяет найти значения  $\lambda_{kl}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, l = 0, 1, 2, \dots$ . Величина индекса  $l$  указывает, сколько раз функция

$$\mathbf{J}_{(2k+1)/2}(\lambda_{kl}) \mathbf{J}_{-(2k+1)/2}(\lambda_{kl} R) - \\ - \mathbf{J}_{-(2k+1)/2}(\lambda_{kl}) \mathbf{J}_{(2k+1)/2}(\lambda_{kl} R)$$

в (11) обращается в 0 на интервале  $0.67 < R < 1$ . Таким образом, сумма (11) построена так, что каждый ее член удовлетворяет граничным условиям. Поэтому, величина  $\tilde{\mathbf{A}}$  также удовлетворяет граничным условиям. Величина  $\gamma$  находится из условия существования нетривиального решения ( $C_{kl} \neq 0$ ) вида (11) уравнений (9), (10). Подробное описание этого решения методом Галеркина можно найти в работе [6].

**РЕЗУЛЬТАТЫ  
ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ**

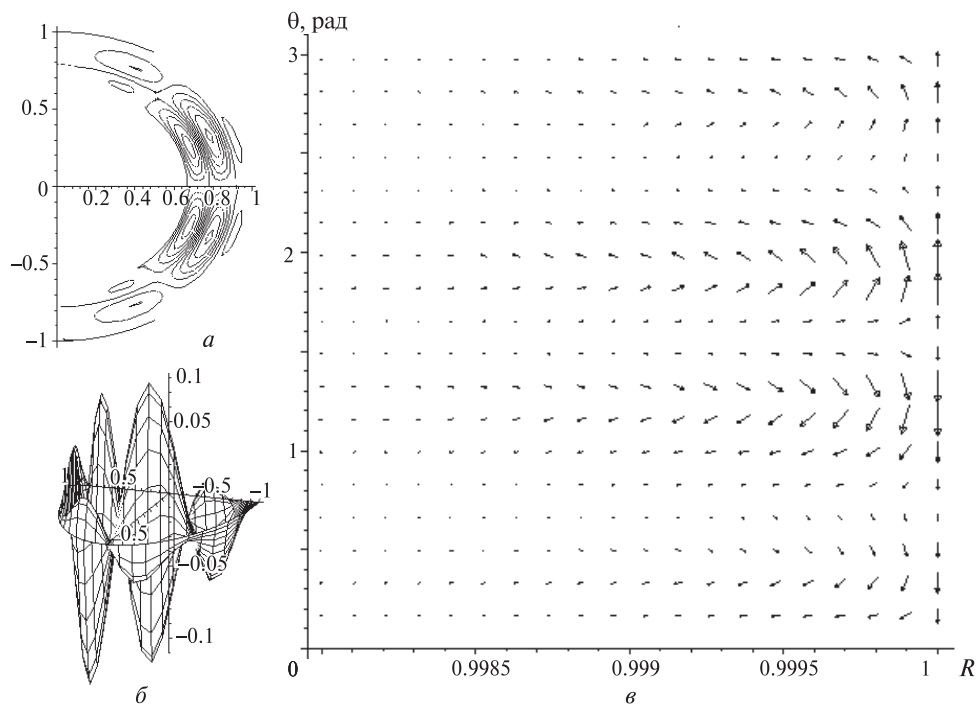
В ходе решения было установлено, что базисные функции, входящие в формулу (11), отличающиеся по четности индекса  $k$ , — ортогональны. При этом четные по  $k$  решения описывают векторный потенциал  $\mathbf{A}$ , функция тока которого  $\Phi = \tilde{A}R\sin\theta$  антисимметрична относительно плоскости экватора (рис. 1, 3), а у нечетных по  $k$  — функция тока симметрична относительно экватора (рис. 2, 4). Отметим, что полоидальное течение, как это следует из (4), проходит вдоль линий постоянного значения функции тока  $\Phi$ . Для нахождения векторного потенциала  $\mathbf{A}$  из уравнений (9), (10) для обоих классов решений в сумме (11) бралось по 9 слагаемых. Для четного класса  $k = 2, 4, 6$ , для нечетного класса  $k = 1, 3, 5$ , и для обоих классов  $l = 0, 1, 2$ .

В результате моделирования для обоих классов получены нарастающие по времени и колебательные с нарастающей по времени амплитудой решения, и затухающие решения. Из них

отобраны те решения, у которых максимально значение  $\text{Re}\gamma > 0$ . Вид этих решений представлен на рис. 1—4.

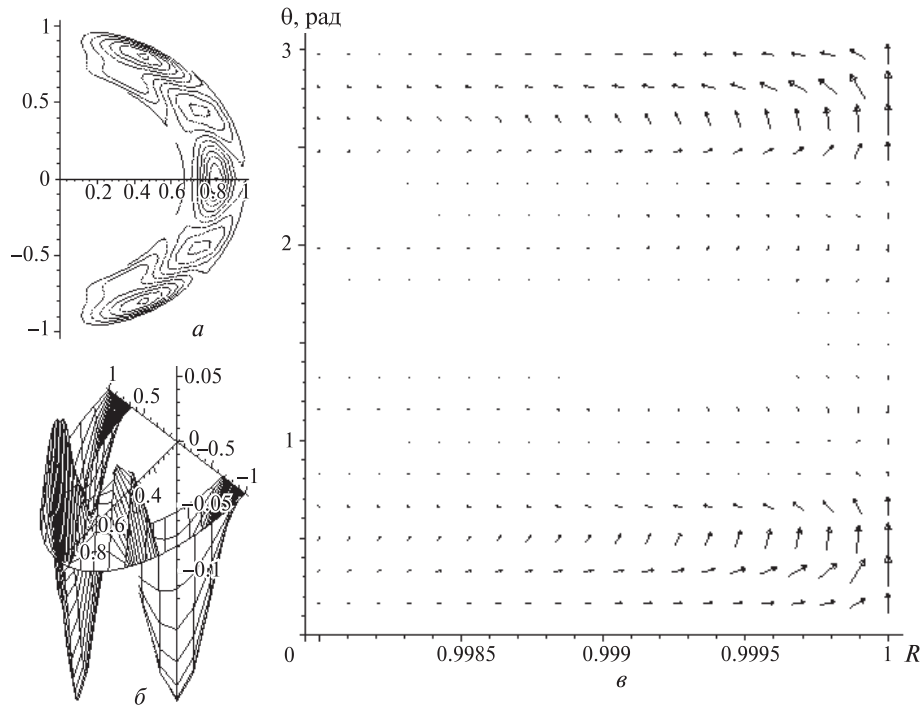
**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В рамках первого приближения, которым мы ограничились, ни абсолютные значения полученных мод, ни даже относительные их значения определены быть не могут. Для этого в модели нужно учесть механизмы, ограничивающие рост амплитуд полученных неустойчивых мод. Такими механизмами могут быть, например, эффекты нелинейности или силы вязкости, которые мы опустили. Поэтому можно говорить только о качественном поведении полученных решений и сравнивать их с процессами, наблюдаемыми на поверхности Солнца, а также с картиной поля скоростей в подповерхностных слоях, построенной в результате решения обратной задачи внутреннего вращения Солнца на основе данных гелиосейсмологических экспериментов.

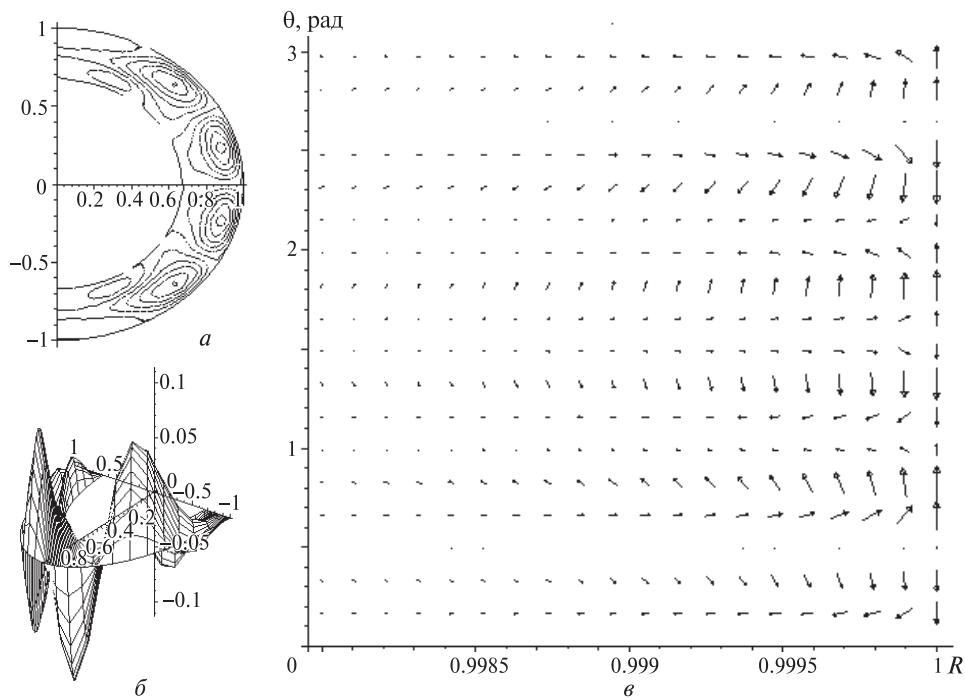


**Рис. 1.** Антисимметричная мода (четные  $k$ );  $\gamma = 4641.3316 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$ . Постоянная времени нарастания полоидальной компоненты скорости течения  $\tau = 1/\gamma \approx 2.5$  сут. *a* — линии уровня функции тока  $\Phi$ , *б* — 3D-график функции тока, *в* — поле скоростей от поверхности до глубины порядка 1.4 тыс. км

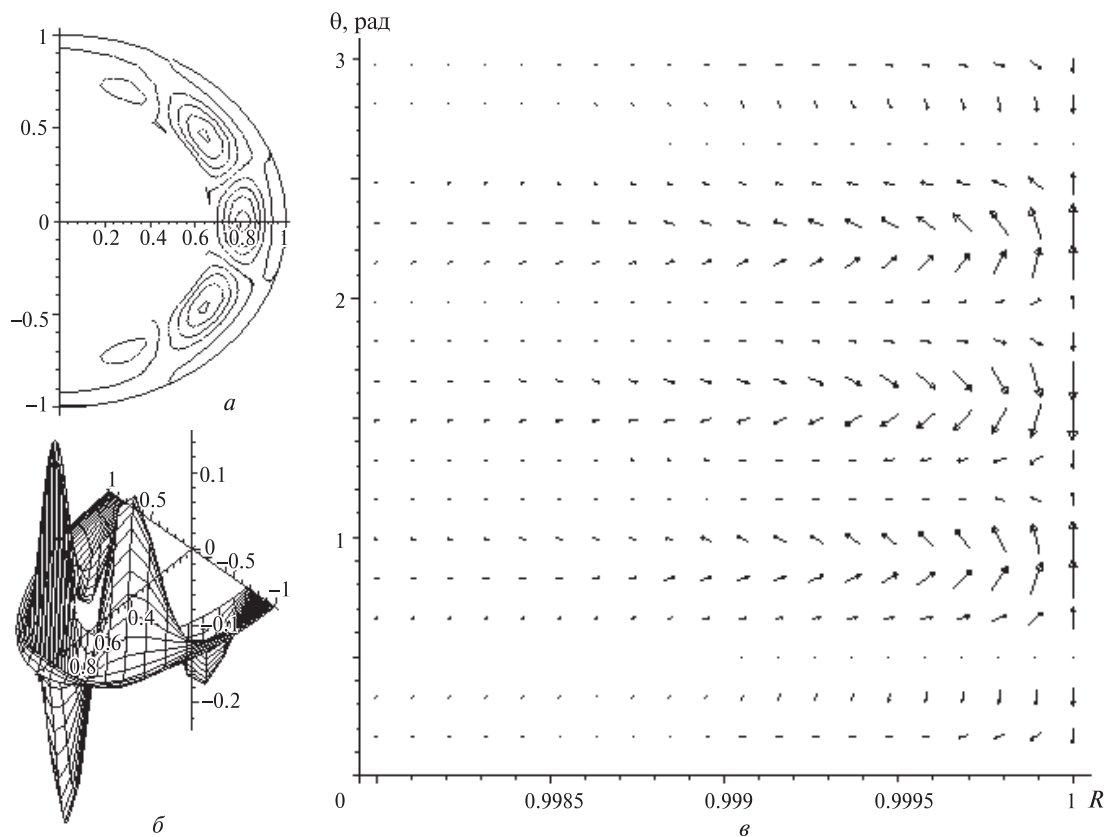




**Рис. 2.** Симметричная мода (нечетные  $k$ );  $\gamma \approx 4533.6260 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Постоянная времени нарастания полоидальной компоненты скорости течения  $\tau = 1/\gamma \approx 2.6$  сут: *a* — линии уровня функции тока  $\Phi$ , *б* — 3D-график функции тока, *в* — поле скоростей от поверхности до глубины порядка 1.4 тыс. км



**Рис. 3.** Антисимметричная колебательная мода (четные  $k$ );  $\gamma = (3667.9440 + 1.5353 \cdot i) \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Постоянная времени нарастания амплитуды колебаний полоидальной компоненты скорости течения  $\tau = 1/\text{Re}\gamma \approx 3.2$  сут. Частота колебаний  $\omega = \text{Im}\gamma = 1.5353 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Период колебаний  $T = 2\pi/\omega \approx 130$  лет. *a* — линии уровня функции тока  $\Phi$ , *б* — 3D-график функции тока, *в* — поле скоростей от поверхности до глубины порядка 1.4 тыс. км



**Рис. 4.** Симметричная колебательная мода (нечетные  $k$ );  $\gamma = (1232.1661 + 10.1049 \cdot i) \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Постоянная времени нарастания амплитуды колебаний полоидальной компоненты скорости течения  $\tau = 1/\text{Re}\gamma \approx 9.4$  сут. Частота колебаний  $\omega = \text{Im}\gamma = 10.1049 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Период колебаний  $T = 2\pi/\omega \approx 20$  лет. *a* — линии уровня функции тока  $\Phi$ , *б* — 3D-график функции тока, *в* — поле скоростей от поверхности до глубины порядка 1.4 тыс. км

На рис. 1, в, 2, в, 3, в, 4, в показано рассчитанное нами поле скоростей до глубины 1.4 тыс. км. (Глубже этого уровня величина скорости настолько мала, что отобразить картину поля скоростей в выбранном масштабе не представляется возможным). Видно, что скорость полоидального течения быстро уменьшается с глубиной. Это обусловлено тем, что в формулу скорости полоидального течения (4), на основании которой построены изображения, плотность входит обратно пропорционально, а последняя, согласно стандартной модели Солнца [11], быстро увеличивается с глубиной.

В результате численного решения уравнений (9), (10) получены симметричные и антисимметричные относительно плоскости экватора моды, как постоянно растущие, так и колебательные с

растущей амплитудой. Поскольку все они независимы, то одновременно присутствуют в объеме Солнца и аддитивно формируют полоидальную скорость. Расчеты показали, что для случая антисимметричной моды (четные  $k$ , рис. 1) до глубины 12 тыс. км полоидальное течение сохраняет свое направление от экватора к полюсам.

Полученные нами результаты согласуются с картиной циркуляции вещества в подфотосферных слоях до глубин 12 тыс. км, построенной на основе данных гелиосейсмологических экспериментов — спектральных наблюдений поля скоростей на всем солнечном диске с помощью прибора *Michelson Doppler Imager*, установленного на борту космического аппарата *SOHO* (методика «кольцевых диаграмм») [9]. Согласно работе [9] подповерхностное полоидальное те-

чение Солнца в основном антисимметрично относительно экватора, т. е. происходит от экватора к полюсам. При этом полоидальные течения северного и южного полушарий оказались асимметричными, что свидетельствует о наличии в циркуляции вещества симметричного компонента. Кроме того, в этой работе воспроизведен также колебательный компонент полоидальной скорости.

Таким образом, предложенная нами гидродинамическая модель полоидального течения Солнца качественно совпадает с картиной циркуляции вещества в подфотосферных слоях, построенной на основе расшифровки данных гелиосейсмологических экспериментов [9]. При этом полученные нами пространственные структуры мод значительно сложнее тех, которые предложены другими исследователями [4, 12].

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977. — 448 с.
2. Вайнштейн С. И., Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А. Турбулентное динамо в астрофизике. — М.: Наука, 1980. — 352 с.
3. Гибсон Э. Спокойное Солнце. — М.: Мир, 1977. — 408 с.
4. Кичатинов Л. Л. Дифференциальное вращение звезд // Успехи физ. наук. — 2005. — **175**, № 5. — С. 475—494.
5. Логинов А. А., Сальников Н. Н., Черемных О. К. и др. О гидродинамическом механизме генерации глобального полоидального течения на Солнце // Кинематика и физика небес. тел. — 2011. — **27**, № 4.
6. Логинов А. А., Самойленко Ю. И., Ткаченко В. А. Возбуждение меридионального течения дифференциальным вращением в жидком ядре Земли // Космічна наука і технологія. — 2000. — **6**, № 2/3. — С. 53—68.
7. Монин А. С. Солнечный цикл. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 68 с.
8. Тассуль Ж.-Л. Теория вращающихся звезд. — М.: Мир, 1982. — 472 с.
9. Basu S., Antia H. M. Characteristics of solar meridional flows during solar cycle 23. // *Astrophys. J.* — 2010. — **717**, N 1. — P. 488—495.
10. Carrington R. C. Observations of the spots of the Sun. — London, 1863. — 264 p.
11. Christensen-Dalsgaard J., Däppen W., Ajukov S. V., et al. The current state of solar modeling // *Science*. — 1996. — **272**, N 5266. — P. 1286—1292.
12. Dikpati M. Simulating solar 'climate' // *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium* / Eds T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, M. A. Geller. — Tokyo, 2009. — P. 171—199.
13. Dikpati M., Gilman P. Flux-transport dynamos with  $\alpha$ -effect from global instability of tachocline differential rotation: a solution for magnetic parity selection in the Sun // *Astrophys. J.* — 2001. — **559**. — P. 428—442.
14. Ferriz-Mass A., Schmitt D., Schüssler M. A dynamo effect due to instability of magnetic flux tubes // *Astron. and Astrophys.* — 1994. — **289**. — P. 949—956.
15. Giles P. M., Duval T. L. Jr., Scherrer P. H., Bogart R. S. A subphotospheric flow of material from the Sun's equator to its poles // *Nature*. — 1997. — **390**. — P. 52—54.
16. Hathaway D.H., Gilman P., Harvey J. W., et al. GONG observations of solar surface flows // *Science*. — 1996. — **272**. — P. 1306—1309.
17. Nandy D., Choudhuri A. R. Explaining the latitudinal distribution of sunspots with deep meridional flow // *Science*. — 2002. — **296**. — P. 1671—1674.
18. Thompson M. J., Christensen-Dalsgaard J., Miesch M. S., Toomre J. The internal rotation of the Sun // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* — 2003. — **41**. — P. 599—643.

Надійшла до редакції 17.12.10

A. A. Loginov, N. N. Salnikov, O. K. Cheremnykh,  
V. N. Krivodubskij, N. V. Maslova

#### HYDRODYNAMIC MODEL FOR GENERATION OF GLOBAL POLOIDAL FLOW OF THE SUN

We propose the semi-empirical hydrodynamic model for global poloidal flow generation caused by the instability of the solar differential rotation. Spatial modes and increment of poloidal flow are determined.

УДК 550.38

А. С. Парновский<sup>1</sup>, А. Ю. Полонская<sup>1,2</sup>, В. Н. Шевченко<sup>1</sup>, И. Т. Жук<sup>1</sup>, Н. В. Маслова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований Национальной академии наук Украины  
та Национального космического агентства Украины, Київ

<sup>2</sup> Национальный авиационный университет, Київ

## РЕГРЕССИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСОВ $a_p$ И $K_p$ : ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе метода регрессионного моделирования была разработана модель, что дозволяє прогнозувати індекси  $a_p$  та  $K_p$  на 3 години вперед. Для  $a_p$ -індексу коефіцієнт кореляції складає 0.86 (0.75 для тривіальної моделі), ефективність прогнозування 0.87, стандартне відхилення 9.15 нТл. Для  $K_p$ -індексу 96 % точок мають відхилення не більше за 1 та 83 % точок мають відхилення не більше за 1/3. Подібно до  $D_{st}$ -індексу,  $a_p$ -індекс має пам'ять з глибиною порядку 1000 годин. Він також містить помітні циклічності з періодами 12 год (добові), 27 діб (карінгтонівські) та 6 місяців (сезонні).

### ВВЕДЕНИЕ

В более ранних работах [1, 2, 6–8] нами был описан метод регрессионного моделирования и применен к задаче прогнозирования  $D_{st}$ -индекса. Ниже этот метод будет применен к индексам  $a_p$  и  $K_p$ .

Результатом применения данного метода являются феноменологические модели, описывающие зависимость выхода нелинейной дискретной динамической системы от ее входов и предыдущих значений выхода. Эти модели могут использоваться, в частности для прогнозирования выхода системы на некоторое количество шагов вперед (с некоторой заблаговременностью). При этом критерии качества прогноза также являются критериями качества модели.

### ОПИСАНИЕ ДАННЫХ И МЕТОДИКИ

В рамках данного метода прогнозное значение выхода  $y^*(T + \Theta)$ , где  $\Theta$  — заблаговременность, ищется в виде

$$y^*(T + \Theta) = C_0 + \sum_{i=1}^m C_i x_i(T - l), l = \overline{0, L}, \quad (1)$$

где  $x_i (i = \overline{1, \dots, m})$  — регрессоры, являющиеся членами полинома Колмогорова—Габорта от значений входов  $u_k(t)$ , известных на момент прогноза  $T$ :

$$x_i(t) = \prod_{k=1}^K u_k^{p_k}(t). \quad (2)$$

Здесь  $K$  — количество измеряемых входов,  $p_k$  — показатели степени ( $\sum_k p_k \leq 4$ ),  $C_i (i = 0, \dots, m)$  — коэффициенты регрессии,  $C_0$  — коэффициент при постоянном регрессоре  $x_0 \equiv 1$ ,  $m$  — количество переменных регрессоров,  $l$  — запаздывание,  $L$  — максимальное запаздывание.

Естественно, истинное значение выхода  $y(T + \Theta)$  зависит также от неизвестных на момент прогнозирования значений входов  $u_k(T + 1), \dots, u_k(T + \Theta)$ . Это означает, что повышая заблаговременность  $\Theta$  мы жертвуем возможностью описания процессов с меньшими временными масштабами. Учитывая этот факт, а также то, что нам доступны усредненные по времени значения входов, мы можем записать

$$y(T + \Theta) = y^*(T + \Theta) + \Delta y(T + \Theta), \quad (3)$$

где  $\Delta y(T + \Theta)$  — ошибка прогноза, которую мы будем считать случайной.

Коэффициенты регрессии мы определяли по методу наименьших квадратов, используя алгоритм Гаусса—Жордана [9], так как нам требовалось знание ковариационной матрицы. Статистическая значимость регрессоров определялась по тесту Фишера [3, 4, 10]. Регрессор считался существенным, если его нельзя было отбросить на уровне значимости 10 %.

© А. С. ПАРНОВСКИЙ, А. Ю. ПОЛОНСКАЯ, В. Н. ШЕВЧЕНКО,  
И. Т. ЖУК, Н. В. МАСЛОВА, 2011

Регрессоры добавлялись в следующем порядке: предыдущие значения выхода (авторегрессия), затем входные параметры, и наконец — комбинации входных параметров согласно (2). На каждом этапе несущественные регрессоры отбрасывались.

В данной работе в качестве выхода  $y$  используется геомагнитный индекс  $a_p$ . Этот индекс изменяется в диапазоне от 0 до 400 нТл и обновляется каждые 3 ч. Он измеряется по данным 13 среднеширотных станций, из которых девять расположены в северном полушарии, а две — в южном. С ним связан индекс  $K_p$ , который является основным в этой паре, однако неудобен для прогнозирования из-за небольшого диапазона принимаемых значений. По этой причине, говоря о прогнозе  $K_p$ -индекса, мы будем подразумевать прогноз  $a_p$ -индекса, пересчитанный по таблице соответствия этих двух индексов. В качестве данных для построения модели использовалась выборка из каталога OMNI2 [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/] с 01.01.1976 г. по 31.12.2000 г. Для проверки результатов прогнозирования использовалась выборка с 01.01.2001 г. по 31.12.2003 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Глубина памяти  $a_p$ -индекса, определенная тем же методом, что и для  $D_{st}$ -индекса в работах [2, 7, 8], оказалась порядка 1000 ч (1.5 каррингтоновских оборота). Это значение хорошо согласуется с результатом работы [5].

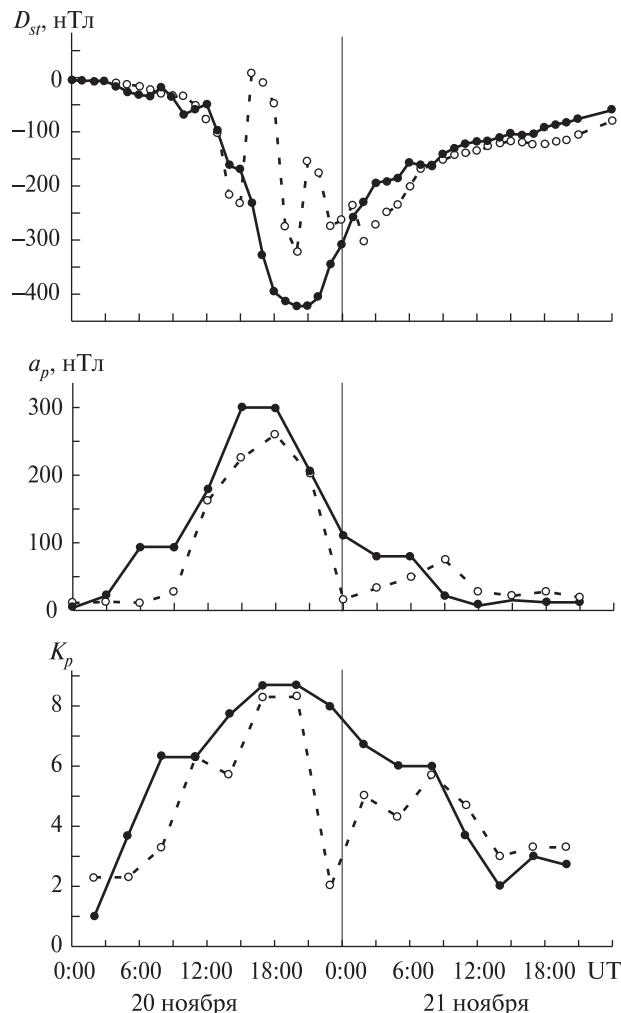
Основные характеристики разработанных моделей для заблаговременности 3 ч приведе-

ны в таблице. В ней используются следующие обозначения: тривиальная модель — модель вида  $y^*(T + \Theta) = y(T)$ ; авторегрессионная модель вида  $y^*(T + \Theta) = C_0 + \sum_{l=0}^L C_l y(T-l)$ ; линейная модель — модель вида  $y^*(T + \Theta) = C_0 + \sum_{l=0}^L C_l y(T-l) + \sum_{k=L+1}^{m+2} C_k u_k(T-l)$ ; нелинейная модель — частная регрессионная модель вида (1); СКО — среднее квадратичное отклонение; PE — эффективность прогноза  $PE = 1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2$ , где  $\sigma_s$  — стандартное отклонение выборки;  $r$  — коэффициент линейной корреляции. Для  $K_p$ -индекса мы указываем долю точек с отклонениями не более 1/3 и 1. Видно, что лишь для нелинейной модели для  $D_{st}$ -индекса при переходе к тестовой выборке произошло существенное понижение статистических характеристик, что указывает на несколько избыточную сложность этой модели.

На рисунке приведено сравнение прогнозного и измеренного значений индексов  $D_{st}$ ,  $a_p$  и  $K_p$  для бури 20—22 ноября 2003 г. Модель для  $D_{st}$ -индекса правильно предсказала начало и продолжительность бури. Колебания во время главной фазы связаны с малой статистикой сверхсильных бурь в учебной выборке. Модель для  $a_p$ - и  $K_p$ -индексов показала менее уверенный результат и требует доработки. Описываемый интервал не входит в учебную выборку.

### Статистические характеристики разработанных моделей при прогнозировании на 3 ч вперед

Модель	Индекс									
	$D_{st}$				$a_p$				$K_p$	
	СКО, нТл	PE, %	$r$ , %	$r_0$ , %	СКО, нТл	PE, %	$r$ , %	$r_0$ , %	$\pm 1/3$ , %	$\pm 1$ , %
<i>Учебная выборка (01.01.1976 г. — 31.12.2000 г.)</i>										
Тривиальная	10.38	82.2	91.1	91.1	13.65	53.5	76.8	76.8	46.2	81.8
Авторегрессия	9.92	83.7	91.5	91.1	12.74	59.6	77.2	76.8	80.1	93.9
Линейная	7.89	85.6	92.5	89.2	8.06	68.5	82.9	71.6	80.0	94.3
Нелинейная	7.38	87.8	93.7	89.3	7.69	71.3	84.6	71.6	81.6	95.6
<i>Экзаменационная выборка (01.01.2001 г. — 31.12.2003 г.)</i>										
Тривиальная	12.00	82.3	91.2	91.2	15.72	53.8	76.9	76.9	46.9	82.6
Авторегрессия	11.59	83.9	91.6	91.2	15.07	58.8	76.9	76.8	80.3	94.0
Линейная	9.26	87.7	93.7	90.6	10.35	67.2	82.4	76.6	81.1	94.8
Нелинейная	12.11	79.8	89.6	90.9	10.80	64.3	80.9	76.6	83.2	96.1



Значения  $D_{st}$ -,  $a_p$ - и  $K_p$ -индексов для бури 20–22 ноября 2003 г.: сплошная линия — наблюдения, штриховая — прогноз на 3 ч вперед

## ВЫВОДЫ

Таким образом, метод регрессионного моделирования, разработанный для прогнозирования  $D_{st}$ -индекса, оказался вполне применим и к индексам  $a_p$  и  $K_p$ . Полученные с его помощью результаты уже представляют практическую ценность благодаря высокой точности (не менее 80–90 %) и высокому быстродействию (не более 1–2 мин).

В данной работе использовалась база данных OMNI2 (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>). Данная работа была частично поддержана НАН Украины и

НКА Украины в рамках программы GEO-UA (Распоряжение Президиума НАН Украины № 322 от 30.05.2008 г. и № 377 от 24.06.2010 г.), а также молодежным грантом (Распоряжение Президиума НАН Украины № 244 от 13.04.2009 г. и Постановление Президиума НАН Украины № 189 от 24.06.2009 г.).

1. Парновский А. С. Прогнозирование  $D_{st}$ -индекса методом линейного регрессионного анализа // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 48–54.
2. Парновский А. С. Метод регрессионного моделирования и его применение к задаче прогнозирования космической погоды // Проблемы управления и информатики. — 2009. — № 3. — С. 128–135.
3. Fisher R. A. Statistical methods for research workers: 12th ed. — London, Oliver and Boyd, 1954. — 356 p.
4. Hudson D. J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability. — Geneva, CERN, 1964. — 320 p.
5. Johnson J. R., Wing S. A cumulant-based analysis of non-linear magnetospheric dynamics. // Report PPPL-3919-rev. — 2004. — ([http://www.pppl.gov/pub\\_report/2004/PPPL-3919rev.pdf](http://www.pppl.gov/pub_report/2004/PPPL-3919rev.pdf)).
6. Parnowski A. S. Statistical approach to Dst prediction // J. Phys. Studies. — 2008. — **12**, N 4. — P. 4003.
7. Parnowski A. S. Statistically predicting Dst without satellite data // Earth, Planets and Space. — 2009. — **61**, N 5. — P. 621–624.
8. Parnowski A. S. Regression modeling method of space weather prediction // Astrophys. and Space Sci. — 2009. — **323**, N 2. — P. 169–180.—doi:10.1007/s10509-009-0060-4. [arXiv:0906.3271].
9. Press W. H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes in FORTRAN 77 and 90. The Art of Scientific Computing. — 2nd ed. — Cambridge — New York — Melbourne: Cambridge Univ. Press, 1992.
10. Seber G. A. F. Linear Regression Analysis. — New York: Wiley, 1977.

Надійшла до редакції 17.12.10

A.S. Parnowski, A.Yu. Polonskaya, V.N. Shevchenko, I.T. Zhuk, N.V. Maslova

## REGRESSION MODELLING FOR $a_p$ AND $K_p$ INDICES: FIRST RESULTS

On the basis of the regression modelling method, the model is developed which allows us to forecast  $a_p$  and  $K_p$  indices three hours ahead. For  $a_p$  index, the linear correlation coefficient is 0.86 (0.75 for the trivial model), the prediction efficiency is 0.87, and the standard deviation is 9.15 nT. For  $K_p$  index, 96 % of all the points have the absolute error not more than 1 unit of  $K_p$ , and 83 % of all the points have the absolute error not more than 1/3 units of  $K_p$ . Similar to the  $D_{st}$  index, the  $a_p$  index has a memory of its previous values for approximately 1000 hours. It also has evident temporal variations with typical periods of 12 hours (diurnal), 27 days (Carrington) and 6 months (seasonal).

УДК 550.385

Ю. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

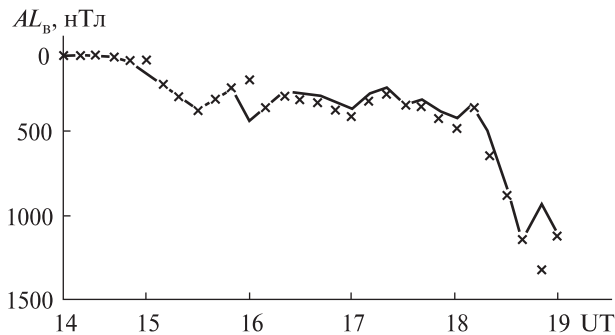
## ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЕЛИЧИНИ ВАРІАЦІЙ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІД ПОЧАТКОВОГО СТАНУ МАГНІТОСФЕРНО-ІОНОСФЕРНОЇ СИСТЕМИ

*Досліджується залежність варіацій геомагнітного поля в авроральних широтах від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи струмів у фазу розвитку великої магнітної бурі. Показано, що інтенсивність західного аврорального іоносферного електроструменя контролюється інтегральним за інтервал в декілька годин параметрами сонячного вітру. Чим більша інтенсивність магнітного збурення у початковий момент, тим більша чутливість системи струмів до зміни параметрів сонячного вітру.*

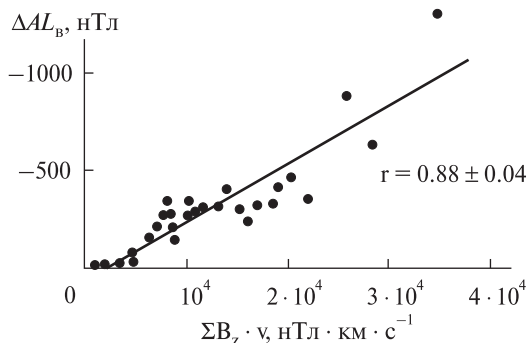
Величина варіацій геомагнітного поля залежить від кількості енергії сонячного вітру, яка поступила у магнітосферу. Передача енергії із сонячного вітру у магнітосферу може проходити шляхом переєднання в замороженому плазмі сонячного вітру міжпланетного магнітного поля з магнітним полем земного диполя [10] або ж «в'язкої» взаємодії між сонячним вітром та магнітосферою [8]. Вважається, що близько 90 % енергії поступає у магнітосферу через процеси переєднання, і тільки 10 % шляхом «в'язкої» взаємодії [9]. Розвиток магнітних бур і суббур обумовлений появою біля магнітосфери південної ( $B_z < 0$ ) складової міжпланетного магнітного поля (ММП), що веде до інтенсифікації названих вище процесів і до збільшення інтенсивності як західного, так і східного авроральних електроструменів [13, 14]. Наростання магнітної активності починається приблизно через 15 хв після появи південної складової ММП  $B_z < 0$  [12], а максимальна кореляція між  $B_z$  і  $AE$ -індексом магнітної активності спостерігається, якщо  $B_z$  випереджає  $AE$  на 40 хв [11, 12]. Для розвитку світових магнітних бур потрібна триваліша дія складової ММП  $B_z < 0$ . При цьому  $B_z$  не повинна бути меншою за 3–5 нТл [16]. На графіках залежності індексів авроральних електроструменів від параметрів міжпланетного середовища видно, що при однако-

вих значеннях цих параметрів величини індексів значно відрізняються. Причиною такого розсіювання може бути те, що реакція магнітосферно-іоносферної системи струмів залежить від стану системи у момент взаємодії. Так, в роботі [7] виявлено залежність початку активної фази магнітосферної суббури від провідності іоносфери в той момент, коли параметри міжпланетного середовища ініціювали суббурю. В роботі [15] на прикладі декількох суббур показано, що інтенсивність відгуку магнітосферно-іоносферної системи струмів залежить від стану магнітосфери у момент зміни параметрів міжпланетного середовища. Виявилось, що інтенсивність індексів західного аврорального електроструменя  $AL$  у максимумі збурення визначається рівнем збуреності геомагнітного поля у момент появи південної  $B_z$ -складової ММП.

Метою даної роботи є дослідження змін індексу  $AL$  в залежності від початкового рівня геомагнітної збуреності для початку головної фази великої магнітної бурі 23 березня 1969 р. Бурю неодноразово вивчали [1, 3, 5]. Джерела цієї бурі досліджено детально в роботі [4]. Вибрано інтервал часу від 14:00 до 19:00 UT 23 березня, який починається появою південної складової ММП  $B_z$ , початком генерації кільцевого магнітосферного струму та незначною дисперсією  $B_z$ -складової ММП ( $\sigma < 1$  нТл в середньогодинних значеннях). Закінчується інтервал в



**Рис. 1.** Зміна індексу  $AL_0$  на початку головної фази бурі. Суцільна крива —  $AL_0$ -індекс обчислювався з використанням даних субавроральних обсерваторій, хрестики — з використанням  $H$ - і  $Z$ -складових авроральних обсерваторій



**Рис. 2.** Залежність змін індексу  $\Delta AL_0$  за десятихвилинні інтервали часу (для 30 інтервалів) від інтегральних величин електричного поля сонячного вітру  $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$ . Прямая лінія — рівняння лінійної регресії, одержане методом найменших квадратів

19:00 UT, коли дисперсія ММП збільшується ( $\sigma = 2.9$  нТл). Тобто для аналізу використано інтервал часу з достатньо стійким ММП. Це значить, що магнітосферно-іоносферна система була у стані, близькому до рівноважного. Значення  $AL$ -індекса визначались за кожний 10-хвилинний інтервал часу по довготньому ланцюжку авроральних і субавроральних обсерваторій.

Відомо [6], що іоносферні авроральні електрострумені (східний і західний) зміщуються по широті з підсиленням магнітної активності. Під час магнітних бур в магнітосфері генерується кільцевий струм, який деформує геомагнітні силові лінії, і внаслідок цього авроральні електростру-

мені зміщуються до екватора. Це значить, що індекси  $AE = AL + AU$ , обчислені за даними авроральних обсерваторій, будуть занижені, оскільки максимуми авроральних електроструменів перебуватимуть уже в зеніті субавроральних обсерваторій. Одержати виправлений індекс  $AE$  можна двома методами: перший — з використанням варіацій горизонтальної складової геомагнітного поля на субавроральних обсерваторіях, другий — за даними вертикальної ( $Z$ ) і горизонтальної ( $H$ ) складових авроральних обсерваторій. Ми використовували індекс  $AL$ , виправлений обома методами. Для першого методу, крім даних авроральних обсерваторій, були використані дані про варіації  $H$ -складової на субавроральних обсерваторіях Якутськ, Сент-Джонс, Оттава, Мінук і Ажінкурт. Другим методом індекс  $AL$  виправлено з використанням додаткових даних про варіації вертикальної складової тільки авроральних обсерваторій. При зміщенні аврорального електроструменя із зеніту магнітної обсерваторії (в зеніті значення  $\Delta H$  — максимальне, а  $\Delta Z = 0$ ) на невеликі відстані збурення реєструється не тільки в горизонтальній складовій, але й у вертикальній. При віддаленні електроструменя від зеніту обсерваторії повний вектор збурення  $\Delta T = (\Delta H^2 + \Delta Z^2)^{1/2}$  зменшується обернено пропорційно віддалі до його центра. Вважаючи, що електрострумень зміщувався на невеликі віддалі, названим фактором нехтуємо.

На рис. 1 показані зміни індекса  $AL_0$  для вибраного інтервалу з використанням обох методів виправлення (хрестики — з використанням  $\Delta H$  та  $\Delta Z$ ). Бачимо добре узгодження величини  $AL_0$ , отриманих обома методами. Зміну  $AL$ -індекса обчислюємо за співвідношенням  $\Delta AL_0 = AL_0 - AL_{01}$ , де  $AL_{01}$  — значення індекса  $AL_0$  о 14:10 UT, тобто на початку досліджуваного інтервалу.

Кількість енергії, яка поступає у магнітосферу при наявності південної складової ММП можна оцінити за величиною електричного поля сонячного вітру за кожний десятихвилинний інтервал. Зміну повної енергії, переданої у магнітосферу, знаходимо як  $F = \sum_1^n B_{zn} \cdot v_n$ , де  $v_n$  — швидкість сонячного вітру в  $n$ -й момент часу, а  $B_{zn}$  — вертикальна складова ММП у цей же момент



часу. Відношення  $\Delta AL_g$  до  $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$  показує зміну інтенсивності західного аврорального електроструменя при зміні напруженості електричного поля сонячного вітру на одиницю.

На рис. 2 показано залежність  $\Delta AL_g$  від  $F$  для кожного 10-хв інтервалу із послідовно зростаючих по тривалості інтервалів часу ( $n = 2 \dots 30$ ) від 14:20 до 19:00 UT. Бачимо, що зміна величини західного електроструменя на кожному інтервалі часу функціонально зв'язана з інтегральною величиною електричного поля, яке переноситься до магнітосфери за цей інтервал. Рівняння лінійної регресії, одержане методом найменших квадратів, має вигляд

$$\Delta AL_g^n = (0.030 \pm 0.001) \cdot \sum_{n=2}^{30} B_{zn} \cdot v_n - (53 \pm 13).$$

Коефіцієнт кореляції складає  $r = 0.88 \pm 0.04$ . Зв'язок між  $\Delta AL_g$  і значеннями  $B_{zn} \cdot v_n$  в той же момент часу і при випередженні  $B_{zn} \cdot v_n$  індексу активності на інтервали, кратні 10 хв, характеризується меншою кореляцією, ніж для  $\Delta AL_g$  з  $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$ . У таблиці показано відповідні значення  $r$  і рівняння лінійної регресії.

Максимальний коефіцієнт кореляції в цьому випадку ( $r = 0.72$ ) бачимо при випередженні дії сонячного вітру на геомагнітну активність на 40 хв. Але і це максимальне значення коефіцієнта кореляції значно менше, ніж значення коефіцієнта кореляції для  $\Delta AL_g$  і  $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$ . А це означає, що рівень магнітної збуреності визначається не тільки станом міжпланетного середовища в конкретний момент часу, але і станом цього середовища в інтервал часу тривалістю декілька годин.

Було обчислено відношення  $\Delta AL_g$  до величини  $F$  для змінного часового інтервалу. Початок інтервалу змінювався з кроком в 10 хв з 14:10 до 18:20 UT. Відношення показує збільшення інтенсивності геомагнітного збурення на одиницю напруженості електричного поля сонячного вітру.

На рис. 3 показано залежність цього відношення від величини індекса  $AL_g$ . Чітко прослідковується збільшення відношення від інтенсивності західного електроструменя. Це значить, що магнітосферно-іоносферна система струмів стає все більше чутливою до величини енергії, яка

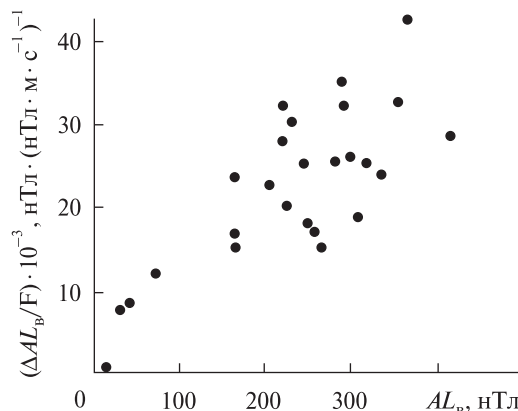


Рис. 3. Залежність відношення  $\Delta AL_g / F$  від величини  $AL_g$ -індексу авроральної активності

**Коефіцієнти кореляції і рівняння лінійної регресії між  $\Delta AL_g$  і  $B_z \cdot v$**

$B_z \cdot v$ випереджає $\Delta AL_g$ , хв	$r$	Рівняння лінійної регресії $\Delta AL_g$ і $B_z \cdot v$
0	$0.48 \pm 0.17$	$(0.19 \pm 0.06) \cdot B_z \cdot v - (77 \pm 68)$
10	$0.45 \pm 0.16$	$(0.12 \pm 0.04) \cdot B_z \cdot v - (104 \pm 177)$
20	$0.63 \pm 0.12$	$(0.24 \pm 0.05) \cdot B_z \cdot v - (19 \pm 56)$
30	$0.62 \pm 0.13$	$(0.23 \pm 0.05) \cdot B_z \cdot v - (76 \pm 56)$
40	$0.72 \pm 0.10$	$(0.28 \pm 0.04) \cdot B_z \cdot v - (70 \pm 55)$
50	$0.58 \pm 0.14$	$(0.27 \pm 0.07) \cdot B_z \cdot v - (82 \pm 78)$
60	$0.61 \pm 0.13$	$(0.30 \pm 0.06) \cdot B_z \cdot v - (100 \pm 67)$

передається із сонячного вітру у магнітосферу, і для генерації певного приросту збурення потрібно все менша кількість енергії.

Таким чином, що спокійніша магнітосферно-іоносферна система, тобто що менше значення  $AL_g$ -індекса, то менший рівень збуреності при певних значеннях параметрів сонячного вітру, і навпаки, що вищий початковий рівень збуреності системи, тим більша величина збурення при тих же значеннях параметрів сонячного вітру.

**ВИСНОВКИ**

1. Інтенсивність аврорального електроструменя контролюється інтегральним за інтервал в декілька годин параметрами сонячного вітру.
2. Чутливість магнітосферно-іоносферної системи до зміни параметрів сонячного вітру збільшується із збільшенням збуреності іоносфери.

3. Що більший початковий рівень збурення, тим більшою буде амплітуда наступної варіації при таких же змінах параметрів міжпланетного середовища.

1. Белов Б. А., Дремухина Л. А., Сумарук П. В. Вариации геомагнитного поля на средних и низких широтах во время геомагнитной бури 23–24 марта 1969 г. // Структура геомагнитных возмущений. — М.: ИЗМИРАН, 1989. — С. 31–41.
2. Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Индексы магнитной активности АЕ во время магнитной бури // Геофиз. журн. — 1994. — 16, № 4. — С. 51–53.
3. Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И., Белов Б. А. Динамика магнитосферной активности в период интенсивной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. — 1989. — 29, № 1. — С. 110–115.
4. Сумарук Ю. П. Динаміка джерел геомагнітних варіацій: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — Київ, 2001. — 20 с.
5. Фельдштейн Я. И., Сумарук П. В., Белов Б. А. Вариации геомагнитного поля в начале и на главной фазе геомагнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. — 1990. — 30, № 1. — С. 37–43.
6. Хорошева О. В. Связь возмущенности магнитосферы с параметрами межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия. — 1986. — 26, № 3. — С. 447–453.
7. Akasofu S.-I., Kan J. R. Importance of initial ionospheric conductivity on substorm onset // Planet. Space. Sci. — 1982. — 12. — P. 1315–1322.
8. Axford W. I., Hines C. O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys. — 1961. — 39. — P. 1443–1459.
9. Baumjohann W., Haerendel G. Dayside convection, viscous interaction and magnetic merging // Solar Wind — Magnetosphere Coupling / Eds Y. Kamide and A. Slavin. — Tokyo: Terra, 1986. — 230 p.
10. Dungey J. W. Interplanetary magnetic field and auroral zones // Phys. Rev. Lett. — 1961. — 6. — P. 47–56.
11. Foster J. G., Fairfield D. H., Ogilvie K. W., Rosenberg T. J. Relationship of the interplanetary parameters and occurrence of the magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. — 1971. — 76, N 28. — P. 6971–6986.
12. Meng C.-I., Tsurutani B., Kawasaki K., Akasofu S.-I. Cross-correlation analysis of the AE-indices and IMF  $B_z$  component // J. Geophys. Res. — 1973. — 78, N 4. — P. 617–628.
13. Perrault P., Akasofu S.-I. A study of geomagnetic storms // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1978. — 54. — P. 547–573.
14. Pytte T., McPherron R. L., Hones E. W., Jr., West H. I., Jr. Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms: Distinction between polar magnetic substorms and convection driven bays // J. Geophys. Res. — 1978. — 83, N 2. — P. 663–683.
15. Rostoker G., Savoie D., Phan T. D. Response of magnetosphere — ionosphere current systems to changes in the interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. — 1988. — 93, N 8. — P. 8633–8641.
16. Russell C. T., McPherron R. L., Burton R. K. On the cause of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. — 1974. — 79, N 7. — P. 1105–1117.

Надійшла до редакції 17.12.10

Yu. P. Sumaruk

#### DEPENDENCE OF GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS ON THE INITIAL STATE OF THE MAGNETOSPHERE-IONOSPHERE SYSTEM

The dependence of the geomagnetic field variations during a great magnetic storm on the initial state of the magnetosphere-ionosphere system is investigated. It is shown that intensity of auroral electrojet is controlled by integral wind parameters for several hours. The sensitivity of the magnetosphere-ionosphere system to changes of the solar wind parameters increases with the enhancement of ionosphere disturbance. The greater is the initial level of the ionosphere disturbance, the greater is the amplitude of the following variations at the same changes of interplanetary medium parameters.

УДК 551.509

**Г. В. Лизунов, А. Ю. Леонтьев**

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

## ПРИБЛИЖЁННОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

*Отримано і проаналізовано наближене дисперсійне рівняння для атмосферних гравітаційних хвиль, що продуктивне при проведенні аналітичних розрахунків. Продемонстровано його застосування для аналізу фазової швидкості, групової швидкості, а також поляризаційних властивостей хвиль.*

**1.** Атмосферные гравитационные волны (АГВ) играют важную роль в динамике верхней атмосферы Земли. Теоретическая интерпретация наблюдений и результатов численного моделирования этих волн в значительной степени основывается на использовании дисперсионного соотношения [5]

$$\omega^4 - \omega^2 c_s^2 (k_x^2 + k_z^2) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 - \omega^2 \frac{\gamma^2 g^2}{4 c_s^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\omega$  — частота,  $k_x$  и  $k_z$  — горизонтальная и вертикальная составляющие волнового вектора,  $g$  — ускорение свободного падения,  $c_s$  — скорость звука,  $\gamma$  — показатель адиабаты. Предполагается, что ось  $OZ$  декартовой системы координат направлена вертикально, ось  $OX$  — в направлении горизонтальной составляющей волнового вектора  $\mathbf{k} = \{k_x, 0, k_z\}$ .

Хотя решение уравнения (1) элементарно записывается относительно волновых чисел  $k_x$  и  $k_z$ , во многих приложениях необходимо оперировать прямой зависимостью  $\omega = \omega(k_x, k_z)$ . Биквадратное уравнение (1) имеет решение

$$\omega = \omega_g \cdot \sqrt{-\frac{p}{2} - \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}}, \quad (2)$$

где  $\omega_g = \sqrt{\gamma - 1} g / c_s$  — частота Брента-Вяйсяля,  $p = -\alpha^{-2} ((k/k_g)^2 + 1)$ ,  $q = \alpha^{-2} (k_x/k_g)^2$ ,  $k^2 = k_x^2 + k_z^2$ ,  $\alpha = \omega_g / \omega_a < 1$ ,  $\omega_a = \gamma g / 2 c_s$  — частота акустичес-

кой отсечки,  $k_g = (2H)^{-1}$ ,  $H$  — высота однородной атмосферы. В силу громоздкости решение (2) неудобно для дальнейших аналитических расчётов. В данной работе представлено более эффективное приближённое решение.

**2.** Введём функцию

$$\xi = \xi(k_x, k_z) = 4 \frac{q}{p^2} = 4 \alpha^2 \frac{(k_x/k_g)^2}{(1 + (k/k_g)^2)^2},$$

максимум которой  $\xi|_{\max} = \alpha^2 < 1$  достигается при  $\{k_x = k_g, k_z = 0\}$ . По мере удаления волнового вектора от этой точки  $\xi \rightarrow 0$ . Используя  $\xi$  как малый параметр и раскладывая решение (2) по  $\xi$ , находим  $\omega = \omega_g \sqrt{-p/q}$ , что в явном виде даёт

$$\omega = \frac{c_g k_x}{\sqrt{1 + (k/k_g)^2}}, \quad (3)$$

где коэффициент  $c_g = (\omega_g / \omega_a) c_s = 2H \omega_g$ . Таким образом,  $c_g$  имеет смысл максимальной скорости АГВ, численно очень близкой к скорости звука (в нижней и средней атмосфере  $c_g = 0.9 c_s$ , в термосфере  $c_g = 0.98 c_s$ ).

На рис. 1 представлены точные дисперсионные кривые АГВ и построенные по формуле (3) приближённые решения. Расчёт выполнен при  $\alpha^2 = 0.81$ , что соответствует условиям нижней и средней атмосферы. Наибольшая погрешность решения (3) составляет около 20 % в точке  $\{k_x = k_g, k_z = 0\}$ , где  $\xi$  максимально. С изменением длины волны и с увеличением угла распространения АГВ  $\theta = \arctg(k_z/k_x)$  точность выражения (3) быстро увеличивается.

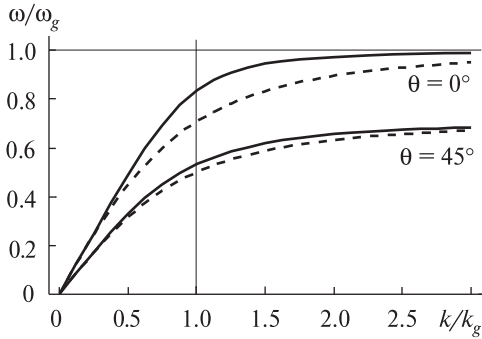


Рис. 1. Точные (сплошные кривые) и приближённые (штрихи) дисперсионные ветви АГВ

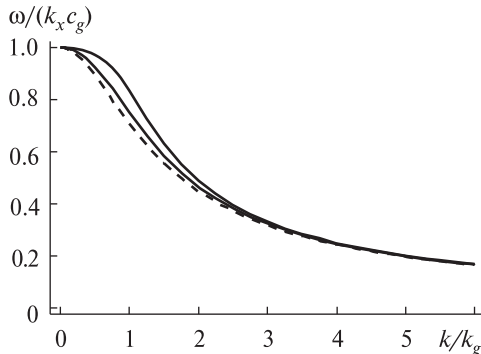


Рис. 2. Горизонтальная фазовая скорость АГВ. Сверху вниз: точные зависимости при  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  и приближённое решение

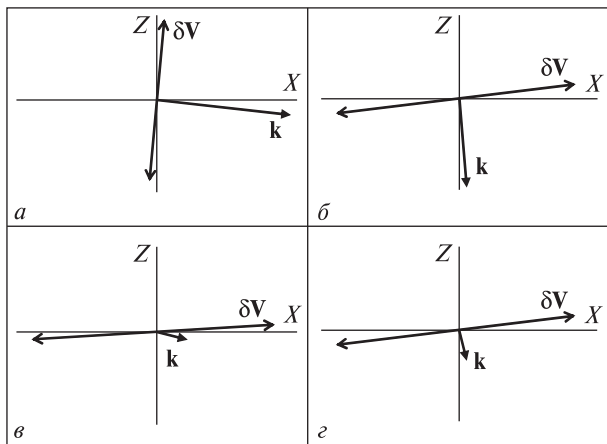


Рис. 3. Направление колебаний частиц в АГВ в зависимости от волнового вектора: а, б — короткие волны, в, г — длинные волны

Из полученной формулы следует, что характер дисперсии АГВ существенно зависит от соотношения между длиной волны  $\lambda$  и волновым масштабом  $\lambda_g = 2\pi/k_g = 4\pi H$  (численное значение которого составляет  $\lambda_g = 90$  км на высотах нижней и средней атмосферы и  $\lambda_g = 400...600$  км в термосфере). В областях коротких и длинных волн закон дисперсии (3) переходит в известные в литературе предельные случаи:  $\omega = k_x c_g$  при  $\lambda \gg \lambda_g$  и  $\omega = \omega_g \cos \theta$  при  $\lambda \ll \lambda_g$  [5, 1].

3. В качестве применения уравнения (3) найдём горизонтальную фазовую скорость АГВ:

$$\frac{\omega}{k_x} = \frac{c_g}{\sqrt{1+k^2/k_g^2}} = \frac{c_g}{\sqrt{1+\lambda_g^2/\lambda^2}}. \quad (4)$$

Данное выражение обнаруживает особые свойства АГВ: 1) монотонную зависимость горизонтальной фазовой скорости от длины волны, 2) ограничение максимальной величины фазовой скорости  $\omega/k_x|_{\max} = c_g$  (рис. 2).

4. Рассмотрим поляризацию АГВ, под которой будем понимать направление колебаний частиц относительно направления распространения волны. Поляризационное соотношение имеет вид [5]

$$\frac{\delta V_z}{\delta V_x} = \frac{Z(\omega, \mathbf{k})}{X(\omega, \mathbf{k})}, \quad (5)$$

где  $\delta \mathbf{V}$  — вектор осцилляций скорости частиц воздуха,  $X = \omega k_x c_s^2 (k_z - i\kappa)$ ,  $Z = \omega(\omega^2 - k_x^2 c_s^2)$  — поляризационные коэффициенты,  $\kappa = (1 - \gamma/2) \times \omega / c_s^2$ .

Для упрощения выражения (5) учтём, что входящий в  $X$  параметр  $\kappa$  численно очень мал. Соответствующий ему вертикальный масштаб  $2\pi/\kappa \sim 2000$  км превышает высоту всей атмосферы Земли, а следовательно, и вертикальные длины распространяющихся в атмосфере волн:  $k_z \gg \kappa$ . Пренебрегая членом  $i\kappa$ , полагая в (5)  $c_g \approx c_s$  и используя приближённое дисперсионное уравнение (3), находим

$$\frac{\delta V_z}{\delta V_x} = -\frac{(k/k_g)^2 k_x}{1 + (k/k_g)^2 k_z}. \quad (6)$$

В коротковолновом пределе ( $k/k_g \gg 1$ )  $\delta V_z/\delta V_x = -k_x/k_z$  или  $\mathbf{k} \cdot \delta \mathbf{V} = 0$  — колебания среды происходят перпендикулярно к направлению распространения АГВ, поляризация попе-

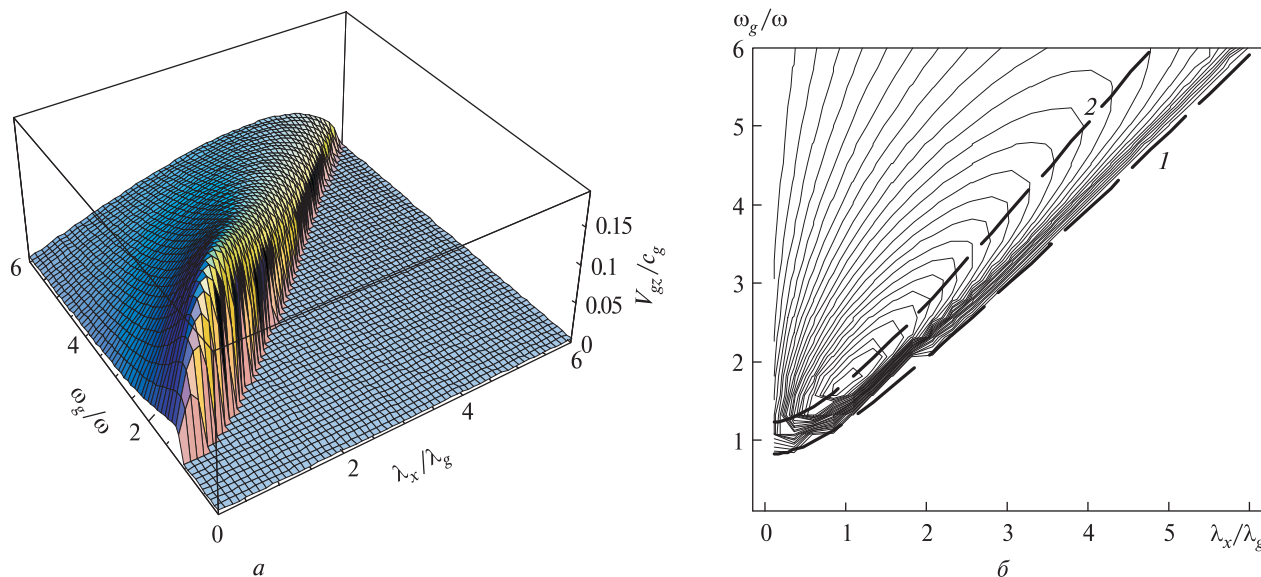


Рис. 4. Трёхмерное распределение (а) и изолинии этого распределения (б) вертикальной групповой скорости АГВ (по  $OX$  — нормированная горизонтальная длина волны  $\lambda_x/\lambda_g = k_x/k_x$ , по оси  $OY$  — нормированный период  $\omega_g/\omega$ , по оси  $OZ$  — нормированная скорость  $V_{gz}/c_g$ ). Кривая 1 — условие отсечки АГВ, кривая 2 — положение гребня (локального максимума) скорости

речная (рис. 3, а, б). С увеличением длины волны возникает продольная составляющая АГВ, причём при  $k/k_g \ll 1$  частицы колеблются почти горизонтально ( $\delta V_z/\delta V_x \rightarrow 0$ ) вне зависимости от направления  $\mathbf{k}$ , как показано на рис. 3, в, г (а с учётом мнимого члена  $ik$  в  $X$  — по чрезвычайно вытянутым эллипсам). При  $\theta \rightarrow 0$  вектора  $\delta \mathbf{V}$  и  $\mathbf{k}$  стремятся к оси  $OX$  с разных сторон, поэтому в двойном пределе  $\theta \rightarrow 0, k \rightarrow 0$  АГВ становится продольной волной.

5. В заключение проанализируем вертикальную групповую скорость АГВ. Согласно (3)

$$V_{gz} = \frac{\partial \omega}{\partial k_z} = -c_g \frac{(k_x k_z / k_g^2)}{(1 + k^2 / k_g^2)^{3/2}}. \quad (7)$$

Максимум этого выражения  $V_{gz}|_{\max} = 3^{-3/2} c_g$  достигается при  $k_x = k_z = k_g$ ,  $\omega = \omega_g / \sqrt{3}$  ( $V_{gz}|_{\max} = 50$  м/с в нижней и средней атмосфере,  $V_{gz}|_{\max} = 135 \dots 170$  м/с в верхней термосфере).

Таким образом, минимальное время распространения АГВ от поверхности Земли до высот  $E$ -области ионосферы составляет около получаса, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [3].

На рис. 4 вертикальная групповая скорость АГВ (7) представлена в зависимости от переменных  $\{k_x, \omega\}$ . Обратим внимание, что поверхность групповой скорости имеет вид острого гребня, локальный максимум скорости достигается на линии 2:  $\omega_2 = \omega_2(k_x) = \sqrt{2/3} \cdot \omega_1(k_x)$ , где  $\omega_1 = c_g k_x / \sqrt{1 + (k_x/k_g)^2}$  — отсечка АГВ при  $k_z = 0$ .

6. В данной работе получено и проанализировано приближённое дисперсионное уравнение для АГВ. Максимальное отклонение точных и приближённых дисперсионных кривых АГВ (около 20 %) достигается в точке  $\{k_x = k_g, k_z = 0\}$  и быстро уменьшается с изменением волнового числа и направления распространения АГВ. Для интерпретации большинства ионосферных наблюдений [4, 6, 2], а также результатов численного моделирования [7] такая вычислительная точность достаточна, поскольку более существенным источником расхождений теории и эксперимента является неидеальность, неоднородность и нестационарность атмосферы.

Во избежание накопления численных ошибок в расчётных схемах компьютерного модели-

рования и для количественных оценок следует использовать строгие соотношения теории АГВ. Приближенное дисперсионное уравнение (3) продуктивно на стадии аналитического исследования, что продемонстрировано в данной работе на примерах анализа горизонтальной фазовой скорости, вертикальной групповой скорости и поляризации АГВ.

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
2. Федоренко А. К. Энергетический баланс акустико-гравитационных волн над полярными шапками по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2010. — **50**, № 1. — С. 111—122.
3. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. — 2004. — **9**, № 2. — С. 130—151.

4. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. and Terr. Phys. — 1975. — **37**. — P. 1011—1054
5. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — **38**. — P. 1441—1481.
6. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. Geophys. — 1996. — **14**. — P. 917—940.
7. Mayr H. G., Harris I., Herrero F. A., et al. Thermospheric gravity waves: observations and interpretation using the transfer function model (TFM) // Space Sci. Revs. — 1990. — **54**. — P. 297—375.

Надійшла до редакції 17.12.10

G. V. Lizunov, A. Yu. Leontiev

#### AN APPROXIMATE DISPERSION EQUATION FOR ATMOSPHERE GRAVITY WAVES

An approximate dispersion equation for atmosphere gravity waves is deduced and analyzed. The equation is productive in analytical calculating. Its application to the analysis of phase velocity, group velocity, and polarization properties of the atmosphere gravity waves is shown.

УДК 523.74

**А. В. Антонов, Ю. М. Герасимов**

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ТРОПОСФЕРУ ЗЕМЛИ

*Досліджено події тривалих змін метеопараметрів тропосфери з 2001 по 2006 рр. при дії одиночних сонячних спалахів Х-рентгенівського класу, які супроводжувались корональним викидом маси (КВМ). Встановлено, що основну дію на висотні профілі температури, тиску і вологості для північних широт від 74° до 60° здійснюють КВМ. Під їхньою дією при сонячному цілодобовому освітленні тропосфери температура збільшується приблизно на 10 °С на висотах понад 9 км. На низьких висотах відбувається охолодження тропосфери на ту ж величину. В умовах полярної ночі профілі змін температури виявляються протилежними. Вище за 6 км атмосфера холодне приблизно на 4 °С, а нижчі шари нагріваються радіаційним випромінюванням Землі на ту ж величину. У всіх випадках зафіксовано зменшення атмосферного тиску, яке на висоті 9 км може перевищувати 10 гПа. Вологість тропосфери в усіх випадках зменшується практично по всій товщі середньої тропосфери. В окремих випадках спостерігався аналогічний вплив на тропосферу прямих сонячних протонів.*

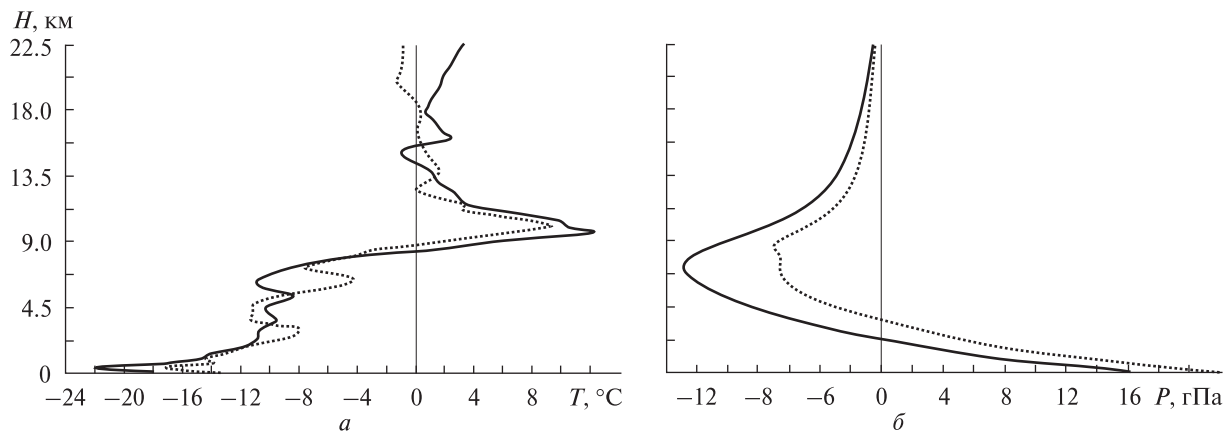
Солнечные вспышки, сопровождающиеся интенсивным рентгеновским излучением и КВМ, оказывают влияние на атмосферу Земли и геомагнитное поле. Исследование связи этих явлений проводится длительное время и продолжает развиваться в связи с актуальностью изучения проблем солнечно-земных связей. Первые исследования в этой области были связаны с изучением воздействия рентгеновского излучения вспышек на атмосферу выше 60 км [1].

Развитие возможностей спутниковых наблюдений позволило обнаружить КВМ, определить параметры их магнитного поля, интенсивность и энергетический спектр протонов в окрестности Земли на высоте 35 тыс. км. Это позволило оценить воздействия протонов высокой энергии, которые попадают в область каспа, севернее 60° геомагнитной широты, на атмосферу на высотах от 60 до 30 км. Это воздействие оказывает как кратковременное, так и долговременное влияние на параметры стратосферы, такие как температура, содержание озона, химический состав, образование водосодержащих комплексов [2].

В соответствии с расчётами [3] протоны с энергией 1 ГэВ достигают высот верхней тропосферы в 20 км и вызывают ионизацию атмосферы с ко-

эффициентом ионизации 30 ионов см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>. Более энергичные протоны могут создавать вторичные ливневые потоки ионизированных частиц на более низких высотах.

Основное воздействие заряженных частиц на атмосферу связано с процессами ионизации, диссоциации и диссоциативной ионизацией. При этом образуются элементы типа NO<sub>x</sub> (N, OH, NO) и NO<sub>x</sub> (N, NO, NO), а также нитрогены типа NO<sub>y</sub>. Ионы кислорода образуют водяные кластеры O<sub>2</sub><sup>+</sup>·H<sub>2</sub>O. Так же образуются кластеры H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>·OH и H<sup>+</sup>·(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> [4]. Положительно заряженные кластеры являются эффективными центрами кристаллизации водяного пара и образования аэрозолей. Температура газовой среды определяется балансом поглощения солнечного излучения и радиационного излучения Земли и собственного теплового излучения. Однако коэффициенты поглощения образующихся химических элементов изучены не достаточно полно. Кроме того, необходимо учитывать изотропное рассеяние образующимися аэрозолями падающего излучения. Поэтому экспериментальное измерение высотных профилей различных метеопараметров тропосферы при воздействии как прямых солнечных протонов, так и протонов КВМ важны, причем наибольший интерес представляют долговре-



**Рис. 1.** Изменение высотного профиля температуры (а) и давления (б) 12 апреля 2001 г. для метеостанции 01028 при воздействии протонов КВМ относительно спокойного дня 14.04 в 12 ч (сплошная линия) и в 24 ч (пунктир)

менные вариации высотных профилей метеопараметров.

Требуемые для исследований профили температуры, давления и влажности были получены по данным пяти метеостанций 01001, 01028, 01152, 12120, 02836, расположенных на северных широтах в пределах от 74.51 до 57.75°, а по долготе от -8.66 до +26.65°. Данные метеостанции приводят высотные профили для 0 ч и 12 ч (здесь и далее время местное). Для анализа долговременных эффектов данный интервал измерений достаточен. Анализ выполнен по серии мощных солнечных вспышек X-рентгеновского класса в 23-м цикле солнечной активности с 2001 по 2006 гг. Отобранные солнечные вспышки сопровождалась КВМ.

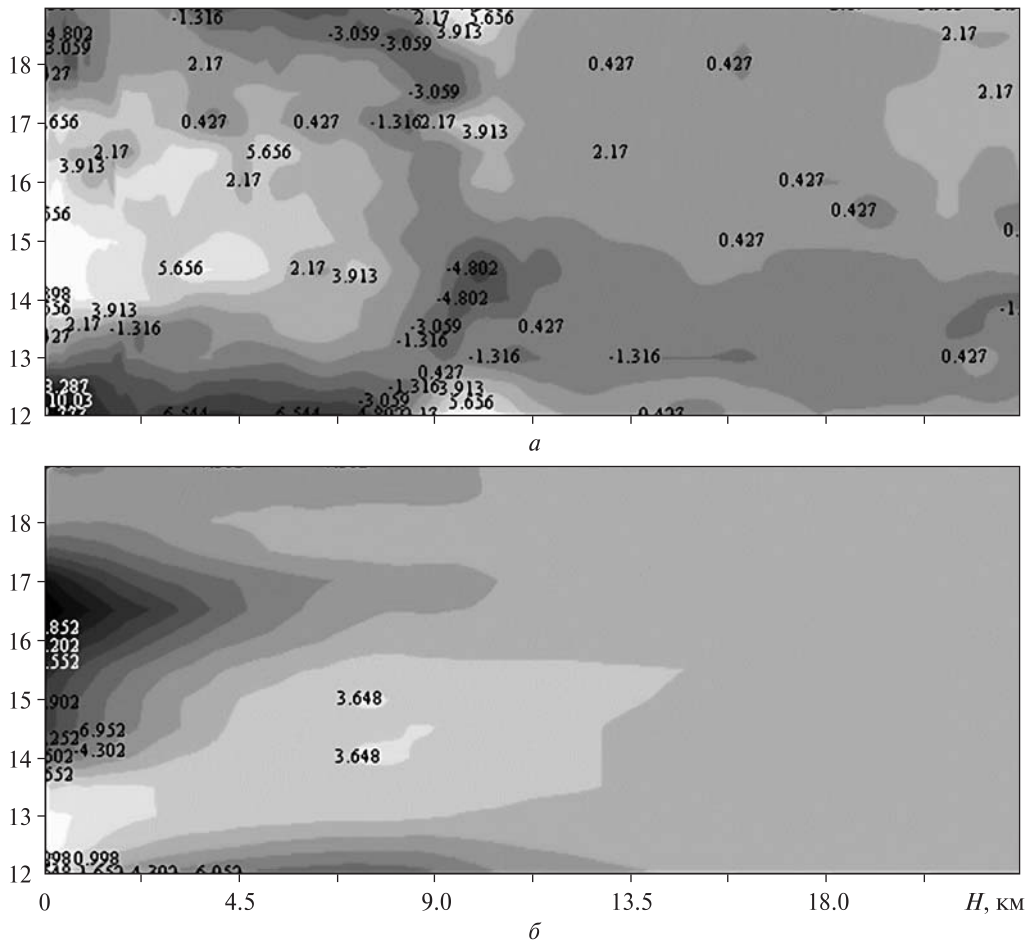
Критерием отбора вспышек было расположение активной излучающей области в центральной части западного полушария Солнца. Генерируемые в этих областях прямые солнечные протоны и КВМ при его распространении вдоль открытых спиральных линий магнитного поля Солнца попадают в околоземное пространство. Данные о магнитных полях и счете протонов различных энергий были определены по измерениям разнесенных по долготе спутников GOES 8—12. Другим критерием отбора был выбор одиночных событий, которым предшествовало несколько суток излучения спокойного Солнца. Это устранило возможность спутывания влияний различных событий.

Момент появления прямых солнечных протонов и КВМ определялся по спутниковым данным, причем приход КВМ регистрировался по времени начала интенсивных геомагнитных возмущений. Проводилась оценка интенсивности и динамического спектра этих возмущений на разнесенных по долготе спутниках, что позволяло оценить структуру магнитного поля КВМ.

Параметры возмущенной тропосферы определялись относительно средних значений совместно ночных и дневных профилей трех предшествующих спокойных дней по геомагнитной обстановке и солнечному излучению, и по сравнению возмущенных профилей в 0 ч, либо в 12 ч с соответствующими по времени профилями близких, предшествующих и заведомо спокойных дней по тем же критериям. В спокойные дни высотные профили метеопараметров были типичными для всех указанных выше метеостанций. Первый вариант определения возмущений использовался для построения трехмерной картины вариаций высотного профиля рассматриваемого метеопараметра в предшествующие и последующие дни относительно рассматриваемой солнечной вспышки. При этом опорное значение профиля для рассматриваемых дней было неизменным, и получаемая трехмерная картина показывала реальные временные вариации метеопараметров. Второй вариант сравнения профилей позволял более наглядно выделять возникающие возмущения в отдельные дни.



Апрель 2001 г.



**Рис. 2.** Трёхмерное представление температурного поля (а) и поля давления (б) тропосферы относительно среднего значения для метеостанции 01028 с 0 ч 12 апреля по 0 ч 19 апреля 2001 г.

Пример воздействия протонов КВМ на высотный профиль температуры в районе метеостанции 01028 Вјогноуа показан на рис 1, а. Здесь приведены данные 12 апреля 2001 г., которые сравниваются с данными для спокойного дня 14 апреля 2001 г. для 0 ч и 12 ч. Полученные графики демонстрируют значительное увеличение температуры до  $10^{\circ}\text{C}$  на высоте 10 км и её уменьшение на такую же величину на нижних высотах до 2 км. Более низкие высоты охлаждаются на большую величину, что может быть связано с поведением атмосферы в приземном слое. Эффект выхолаживания приземного слоя во время полярных сияний известен. Аналогичное пове-

дение высотного профиля вызывают протоны КВМ 18.04.01. Воздействие протонов КВМ приводит и к значительному изменению высотного профиля давления, что следует из рис. 1, б. Здесь показано возмущение давления 12 апреля 2001 г. в 0 ч и 12 ч по сравнению с ближайшими спокойными днями. Максимум падения давления до  $-13$  гПа возникает в 0 ч на высоте 7 км. Ниже оно увеличивается и в приземном слое достигает  $+16\dots+20$  гПа. Характер изменения давления после возмущения тропосферы для 12 ч 12 апреля 2001 г. носит такой же характер.

На рис. 2, а для той же метеостанции приведено трёхмерное изображение вариаций профиля

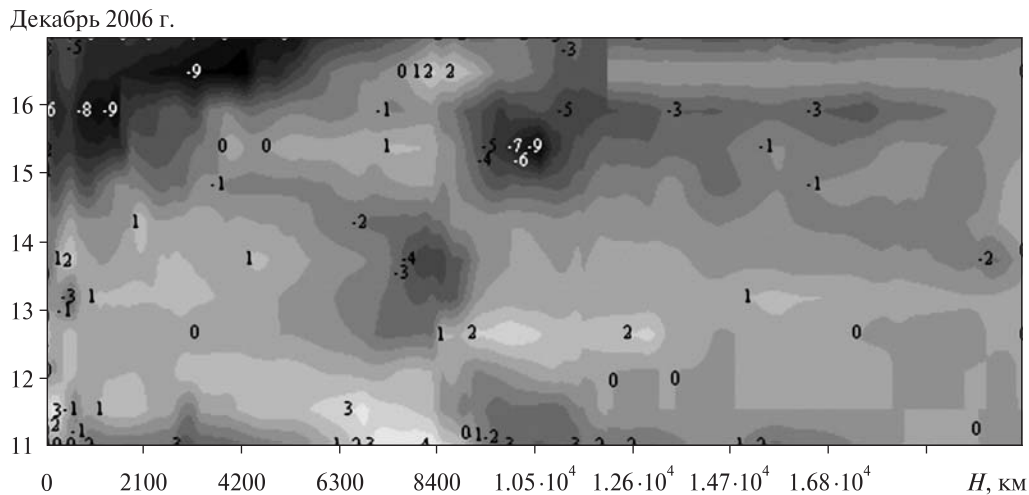


Рис. 3. Трёхмерное представление температурного поля тропосферы относительно среднего значения для метеостанции 01028 с 0 ч 11 декабря по 0 ч 17 декабря 2006 г.

температур в тропосфере с 0 ч 12 апреля до 0 ч 19 апреля 2001 г. Вариации температур получены, как указано выше, относительно среднего значения спокойных дней. Выделяются три зоны повышения температуры на высоте 10 км. При этом зоны около 12 и 18 апреля 2001 г. связаны с приходом протонов КВМ, что подтверждается значительными флуктуациями магнитного поля по спутниковым данным. Зона около 16 апреля менее контрастна и связана с воздействием прямых солнечных протонов, которые не блокируются магнитным полем КВМ и регистрируются спутником во время вспышки.

Аналогично полученное трехмерное изображение высотного профиля давления в этот же период относительно спокойных дней показано на рис. 2, б. Здесь также выделяются три области падения давления на высотах около 7 км под воздействием протонов КВМ 12 и 18 апреля 2001 г. и воздействие прямых солнечных протонов 16 апреля. Указанные результаты соответствуют условиям полярного дня. Поэтому результаты для 0 и 12 ч близки между собой. Это позволяет судить, что длительность описанных процессов может составлять одни сутки.

Аналогичным способом построен трехмерный рис. 3 относительного распределения температуры для случая полярной ночи для той же

метеостанции с 0 ч 11 декабря по 0 ч 17 декабря 2006 г. В этот период наблюдались пять случаев прихода КВМ примерно в 0 ч 12, 13, 16, 17 декабря и наиболее мощный всплеск флуктуаций магнитного поля после 12 ч 14 декабря. Протоны всех этих КВМ оказали влияние на высотный профиль температуры. Выделяется также зона охлаждения на  $4^\circ$  на высоте 8 км 13 декабря, что связано с воздействием прямых протонов зарегистрированных спутником GOES. В отсутствие солнечного освещения виден эффект вымораживания верхней тропосферы на высотах около 9 км. Нагрев более нижних слоев тропосферы происходит за счет радиационного излучения подстилающей поверхности в ИК-диапазоне. По нашему мнению, наблюдаемые явления могут быть связаны с изменением коэффициента поглощения тропосферы за счет образования положительных кластеров и формирования на их основе аэрозолей, вызывающих эффект изотропного рассеяния падающего излучения. При этом влияние рассеяния излучения аэрозолями является определяющим фактором изменения метеопараметров средней и верхней тропосферы.

Необходимо отметить, что степень воздействия протонов КВМ на тропосферу зависит от структуры магнитного поля КВМ. Однородные

магнитные поля КВМ, которые по данным разнесенных на 60° по долготе спутников, имеют высокую корреляцию интенсивности флуктуаций, оказывают максимальное влияние на тропосферу, поскольку они эффективно удерживают протоны высоких энергий.

Наблюдаемые эффекты максимальны в начальном периоде ионизации и в течение суток сглаживаются возникающей циркуляцией в тропосфере, несмотря на продолжающееся воздействие энергичных протонов. Возникающие градиенты температуры и давления могут вызывать крупномасштабные циркуляции атмосферы, которые влияют на погодные условия в приземном слое.

1. Антонов А. В. Поляризационное исследование аномально поглощения космического радиоизлучения в ионосфере на средних широтах // Космич. исслед. — 1972. — **10**, № 2. — С. 223—227.
2. Jackman C. H., Fleming E. L., Vitt F. M. Influence of extremely large solar proton events in a changing stratosphere // J. Geophys. Res. — 2000. — **105**. — P. 11659—11670.
3. Reid G. C. Chapter 12. Solar energetic particles and their effects on the terrestrial environment // Physics of the Sun. — 1986. — Vol. III. — P. 251—278.
4. Solomon S., Rusch D. W., Gerard J. C., et al. The effect of particle precipitation events on the neutral and ion chem-

istry of the middle atmosphere. 2. Odd hydrogen // Planet. Space Sci. — 1981. — **29**. — P. 885—892.

Надійшла до редакції 17.12.10

A. V. Antonov, Yu. M. Gerasimov

#### ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF SOLAR FLARES ON THE EARTH'S TROPOSPHERE

We investigated some events of long-term change of meteorological parameters of the troposphere under the influence of single solar flares of the X-ray type which were accompanied by coronal mass ejection (CME), from 2001 to 2006. It is established that the basic effect on high-altitude profiles of temperature, pressure and damp for northern latitudes from 74 to 60 degrees is produced by CME. At round-the-clock irradiating the troposphere by the Sun, the CME action results in an increase of temperature by more than 10 °C at heights more than 9 km. At the lower altitudes, the troposphere temperature decreases by the same value. Under the polar night conditions, the profiles of temperature change appear opposite. At altitudes more than 6 km, the atmosphere cools down by about 4 °C. Lower layers are heated up by the Earth's radiation by the same magnitude. In all the cases the decrease of atmospheric pressure is detected. At a height of 9 km, the atmospheric pressure can exceed 10 hPa. For all the cases, the troposphere damp decreases across the whole thickness of the mean troposphere. In specific cases similar influence of direct solar protons on the troposphere is detected.

УДК 528.813:551.510.534

**А. В. Шаврина<sup>1</sup>, И. А. Микульская<sup>2</sup>, С. И. Кифоренко<sup>2</sup>,  
В. А. Шеминова<sup>1</sup>, А. А. Велесь<sup>1</sup>, О. Б. Блюм<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій і систем Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, Київ

<sup>3</sup> Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка Національної академії наук України, Київ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗОНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ КИЕВА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

*Моделювання приземного озону в Києві для епізоду його підвищеного вмісту у серпні 2000 р. було виконано за допомогою моделі міського забруднення повітря UAM-V. Дослідження загального вмісту озону над Києвом та змін його концентрації з висотою в тропосфері виконано на основі наземних спостережень з інфрачервоним фур'є-спектрометром у Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України у рамках проекту ESA-NIVR-KNMI N 2907. У 2008 р. з'явилися дані супутника «Aura-ОМІ» за профілями озону в атмосфері ОМОЗРР, що включають вміст озону в нижньому шарі атмосфери, починаючи з 2005 р, які можна використовувати при оцінці концентрації приземного озону у всіх великих містах України. Статистичне дослідження даних із забруднення повітря озоном у м. Києві та даних медичної статистики по захворюваннях системи зовнішнього дихання населення міста було проведено за допомогою пакета прикладних програм «Statistica». Проведено регресійний аналіз, побудовано прогностичні моделі регресії, виконано ретроспективне прогнозування епідеміологічної ситуації щодо патологій системи зовнішнього дихання у м. Києві в 2000–2007 рр.*

### ВВЕДЕНИЕ

Моделирование концентраций приземного озона в Киеве для эпизода его повышенного содержания в августе 2000 г. [1, 10, 11] было выполнено с помощью модели городского загрязнения воздуха UAM-V [12]. Также было проведено исследование общего содержания озона над Киевом и изменений его концентраций с высотой в тропосфере на основании наземных наблюдений с инфракрасным фурье-спектрометром в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины (ГАО) в рамках проекта ESA-NIVR-KNMI no 2907 «OMI validation by ground based remote sensing: ozone columns and atmospheric profiles» (2005–2008 гг.) [3, 4, 9].

Приземный озон — вторичное высокотоксичное для человека и всего живого вещество. Он образуется в результате фотохимических реакций из веществ-предшественников, выделяемых

главным образом с выхлопными газами автотранспорта и выбросами больших технических предприятий, и по сути является индикатором техногенной загрязненности исследуемых территорий [2, 10, 14, 15].

Озон открыт в 1840 г. Шенбейном, и почти сразу начались измерения его концентраций на горе Пик-дю-Миди во Франции. Длинный ряд высокогорных наблюдений с 1870 г. до наших дней показал увеличение фоновых концентраций озона в воздухе с 10 ppb (миллиардных частей по объему) более чем в пять раз. А эта величина находится на уровне рекомендуемой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) предельно допустимой 8 ч концентрации приземного озона 50 ppb [15].

В мониторинговой сети Европы сегодня официально зарегистрирована 2171 станция мониторинга озона [7]. Станции — разного типа: городские, сельские и фоновые, из них в странах ЕС — 2111 (во Франции — 439, в Испании — 367, в Германии — 286, в Италии — 235), в Чехии — 71,

© А. В. ШАВРИНА, И. А. МИКУЛЬСКАЯ, С. И. КИФОРЕНКО,  
В. А. ШЕМИНОВА, А. А. ВЕЛЕСЬ, О. Б. БЛЮМ, 2011

Польше — 68, Румынии — 27, Латвии — 6, Литве — 15, Эстонии — 7). В то же время в Украине мы не имеем ни одной официально зарегистрированной в упомянутой Европейской сети станции по мониторингу озона, а наши метрологические службы не имеют поверочных приборов для измерения приземного озона при помощи газоанализаторов. Тем не менее, загрязненность озоном территории Украины (Киев, Карпаты) и ее воздействие на растения изучалась О.Блюмом и сотрудниками, начиная с 1996 г. [5, 6].

Интенсивное изучение химии приземного озона и его опасного действия на здоровье людей и урожаи началось после 40 % потери урожая в Европе в 1940 г. Он образуется реакцией  $O + O_2 + M \equiv O_3 + M$ , где  $M$  — молекула-катализатор, например  $N_2$ . Атом кислорода в городской атмосфере образуется из окислов азота  $NO_x$  ( $NO_2 + NO$ ) в фотохимической реакции под действием солнечного излучения с длиной волны  $\lambda < 424$  нм, (излучение с длиной волны  $\lambda < 290$  нм задерживается стратосферным слоем озона на высоте 20—35 км над землей):  $NO_2 + h\nu \equiv NO + O$ . Но  $NO$  снова окисляется озоном до  $NO_2$ , поэтому накопления озона в этом цикле не происходит. Должна быть другая причина окисления  $NO$  в  $NO_2$ , и она была найдена — пероксидные радикалы, которые образуются в атмосфере окислением кислородом летучих органических соединений как природного, так и антропогенного происхождения:  $NO + RO_2 \cdot \equiv NO_2 + RO \cdot$ , где  $R$  — любой органический фрагмент, например  $C_2H_5$ .

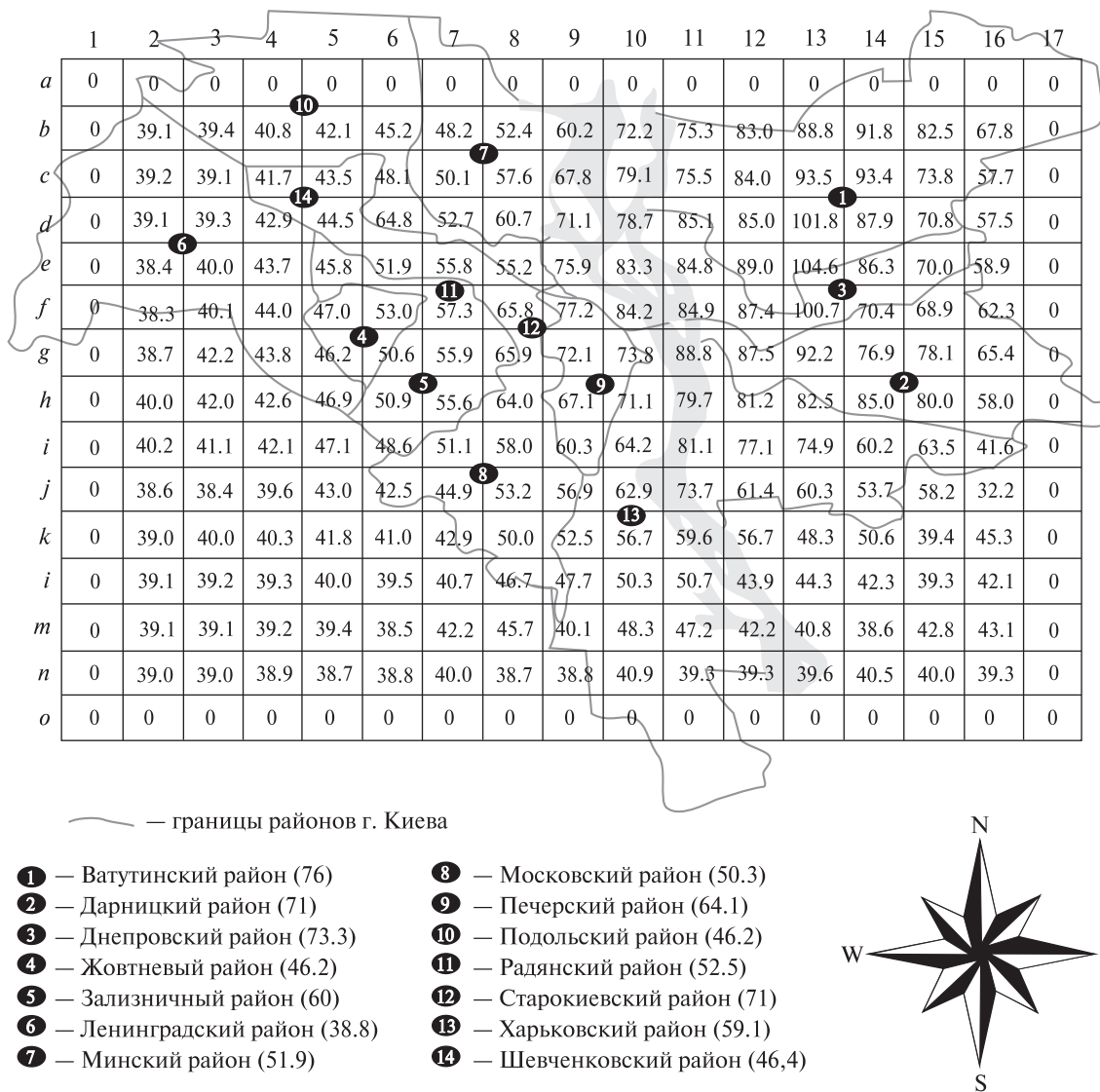
Как химическое и токсическое вещество озон хорошо изучен [14, 15]. Что же касается его действия на здоровье жителей современных городов, то, в отличие от США и стран Европы [8, 13—16], в Украине этот вопрос только начинает изучаться. В то же время именно здесь эта проблема требует самого внимательного изучения: во-первых, из-за сложностей экономической и медико-экологической обстановки, сложившейся в последние годы; во-вторых, по причине интенсивного превращения городов в современные мегаполисы с огромным парком автотранспорта. Явление это со многих точек зрения новое, еще не изученное, в том числе и в медико-экологическом аспекте.

Основная цель данной работы — провести ретроспективное исследование влияния приземного озона на здоровье жителей г. Киева, начиная с 2000 г. (к сожалению, мы пока не располагаем данными медицинской статистики для 2008—2010 гг.).

Известно, что озон — загрязнитель воздуха первого класса опасности по действию на здоровье людей и животных, растения и строительные сооружения. Основной мишенью действия озона на здоровье человека являются его система внешнего дыхания (СВД) и сердечно-сосудистая система [2, 8, 16]. Задача данной работы состоит в исследовании и апробации прогнозирования связи концентраций озона в Киеве и показателей состояния системы дыхания населения города. Предполагается в дальнейшем использовать результаты этого исследования для оценки рисков вредного воздействия озона на здоровье жителей Киева и других городов Украины, как на популяционном, так и на индивидуальном (личностном) уровне. Отметим очень высокие концентрации приземного озона в летние эпизоды в Одессе (до 200 ppb), даваемые моделированием программой EURAD в Рейнском институте проблем экологии при Кельнском университете (<http://www.eurad.uni-koeln.de/>).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения запланированной работы мы обратились к статистическим данным городского управления охраны здоровья (ГУОЗ) и Министерства здравоохранения (МЗ) относительно состояния СВД населения 14 районов г. Киева по 12 показателям, определяющим общую и первичную заболеваемость населения города озонозависимыми патологиями системы за период 2000—2007 гг. Полученные данные касались пяти социально-возрастных групп жителей г. Киева — детей, подростков, взрослых, трудоспособных и пенсионеров. Данные усредненной максимальной загрязненности озоном 14 районов г. Киева, а также по Киеву в целом, для «озонового эпизода» в августе 2000 г. рассчитывались по результатам моделирования концентрации озона с учетом процессов озонобразования и



\* в скобках приводятся средние порайонные концентрации приземного озона

**Рис. 1.** Усредненные максимальные концентрации приземного озона по районам г. Киева, рассчитанные по результатам моделирования озонового эпизода в августе 2000 г.

рассеяния вещества в приземном слое атмосферы над городом [10, 11], рис. 1. При моделировании была использована модель UAM-V [12], учитывающая рельеф города, метеорологические условия, интенсивность солнечного излучения, количество объемных и точечных выбросов в атмосферу промышленными предприятиями, количество в городе автотранспорта, скорость транспортных потоков.

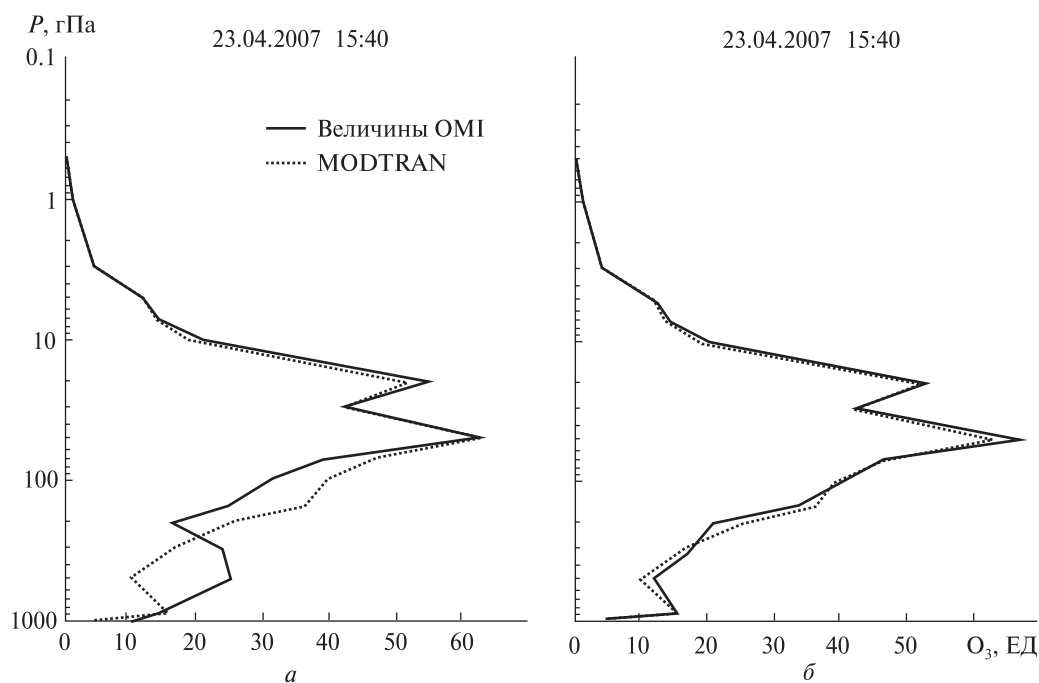
В 2008 г. появились спутниковые данные Aura-OMI по профилям концентрации озона в атмосфере OMO3PR ([http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omo3pr\\_v003.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omo3pr_v003.shtml)), включающие содержание озона в нижнем слое атмосферы, начиная с 2005 г. Мы выполнили сравнение этих профилей озона для Киева и полученных нами из наблюдений с инфракрасным фурье-спектрометром и модели-

рования программой MODTRAN4 [3, 4]. Первое сравнение нашего профиля для 23 апреля 2007 г. показало существенное различие с профилем Aura-OMI в тропосферной части профиля (рис. 2, а). Однако данные OMI версии 2009 г. хорошо согласуются с нашим профилем для этой же даты (рис. 2, б). Это дает основание для использования данных OMI при оценке концентраций приземного озона во всех крупных городах Украины.

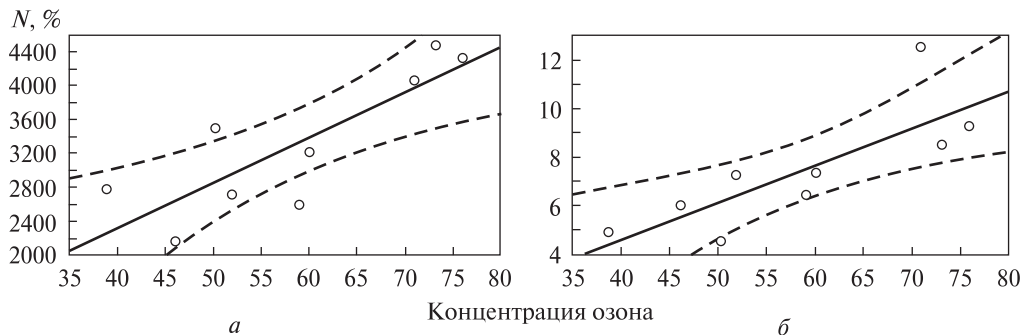
Статистическое исследование имеющихся данных было проведено при помощи пакета прикладных программ «Statistica» (например [http://softnic.ru/soft/programm\\_4456.html](http://softnic.ru/soft/programm_4456.html)). Оно включало корреляционное сопоставление данных порайонной озоновой загрязненности и усредненных показателей состояния СВД в районах города. При этом определялись коэффициенты корреляции между значениями сопоставляемых факторов, проводился регрессионный анализ, строились прогностические модели регрессии.

#### ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА НА СОСТОЯНИЕ СВД ЖИТЕЛЕЙ г. КИЕВА (2000 г.)

Первое в Украине эпидемиологическое исследование проблемы озона было проведено нами по данным моделирования концентраций озона в 2000 г. [2]. В то время административное устройство г. Киева включало 14 районов, каждый из которых обслуживался сетью районных поликлиник, поставляющих статистические данные в киевский центр «Мединстат». Это дало возможность провести полноценное статистическое сопоставление усредненных порайонных показателей состояния СВД населения города и усредненных максимальных порайонных концентраций озона, рассчитанных по результатам моделирования программой UAM-V[12] (рис. 2). Проведенное корреляционное исследование показало, что для социально-возрастной группы «взрослые», составляющей более 70 % населения города, статистически существенные связи про-



**Рис. 2.** Сравнение нашего восстановленного атмосферного профиля озона с данными OMI (ОМОЗР): а — данными OMI версии 2008 г., б — данными OMI версии 2009 г. Концентрации озона выражены в суммарных количествах (ЕД) для каждого из 18 слоев атмосферы, определенных в данных ОМЗР



**Рис. 3.** Распространенность  $N$  заболеваемости взрослого населения (на 100 000 человек) болезнями органов дыхания (*а*) и детей (на 1000 детей) астматическим бронхитом (*б*) со средними максимальными концентрациями озона для «спальных» районов г. Киева. Штриховые линии — уровень достоверности 95 %

явились по показателям «болезни органов дыхания» и «пневмония». По социально-возрастной группе «дети» статистически достоверная связь обнаружилась по показателю «астматический бронхит» ( $r = 0.66$ ). Связь между заболеваниями астмой у детей и пиковыми концентрациями озона исследовалась, например, в работе [13].

При выделении из исследованных районов города девяти окраинных, «спальных» районов с примерно одинаковой плотностью населения (5 тыс. жителей на 1 км<sup>2</sup>) оказалось, что в этом случае отмечаются более высокие корреляционные связи между сопоставляемыми факторами. У взрослых они достигали значений  $r = 0.83$ , у детей  $r = 0.80$  (рис. 3). Далее с учетом обнаруженных корреляционных связей был проведен регрессионный анализ исследуемых данных, и были построены уравнения линейной регрессии, которые позволили прогнозировать состояние СВД жителей г. Киева по показателям «болезни органов дыхания» у взрослых и «астматический бронхит» у детей — в зависимости от летних пиковых концентраций приземного озона в районах их проживания.

Прогнозирование эпидемиологической ситуации относительно патологий СВД в г. Киеве в 2002—2006 гг. было осуществлено с привлечением данных измерений приземного озона, проводимых в Национальном ботаническом саду им. Н. Н. Гришко НАН Украины, спутниковых данных (Augs-OMI), а также результатов моделирования концентраций приземного озона для

Европы (включающим территорию Украины), проведенного Рейнским институтом проблем экологии при Кельнском университете. Предполагалось, что полученные данные характеризуют средние по городу максимальные концентрации озона в 2000—2006 гг. На их основе для Киева была спрогнозирована общая заболеваемость болезнями органов дыхания (взрослые) и астматическим бронхитом (дети).

Сравнение результатов прогнозирования и данных медицинской статистики за 2000—2006 гг. по г. Киеву (таблица) показало, что прогнозы, построенные по результатам моделирования в основном подтвердились. Так, коэффициент корреляции по «болезням органов дыхания» (взрослые) составил 0.76 для концентраций озона по данным моделирования и 0.72 для данных, полученных при помощи УФ-анализатора озона (ТЕСО-49С). По спутниковым данным Auga-OMI (2005, 2006 гг.) для этих же показателей были получены достаточно близкие к фактическим значениям оценки заболеваемости патологиями СВД. Отметим также, что если в центральной и южной Европе пик концентрации приземного озона пришелся на 2003 г., за которым последовало некоторое уменьшение, то для Восточной Европы этого не произошло, по-видимому из-за увеличения количества автомобильного транспорта со старыми системами сжигания топлива, которые запрещены в странах ЕС.

Следует отметить, что Всемирная организация здравоохранения ВОЗ [15] выделяет как осо-



бо опасные для здоровья людей четыре загрязняющих воздух вещества: твердые частицы, озон, двуокись азота и двуокись серы. Если озон непосредственно повышает риск заболеваний системы дыхания, то остальные три загрязнителя усугубляют действие озона. Являясь продуктами выбросов автотранспорта и промышленных предприятий, они также участвуют и в процессах формирования озона в качестве его предшественников. В работе [8] сообщается о значительном усилении эффектов  $O_3$  на функциональные изменения в здоровье людей в сочетании с другими неблагоприятными факторами окружающей среды. В рекомендациях ВОЗ 2005 г. [15] понижена рекомендуемая максимальная средняя 8-ч концентрация поверхностного озона с 120 до 100  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ , что было обусловлено пополнением знаний о влиянии озона на здоровье за счет эпидемиологических исследований.

Мы рассчитали среднюю квадратичную ошибку  $\epsilon$  одного прогноза для каждой строки таблицы.

Для заболеваний «болезни органов дыхания» у взрослых она составила 15 % по данным моделирования уровней концентраций приземного озона и 16.5 % по данным инструментального измерения озона. По правилу  $2\epsilon$  (вероятность 95 %) мы можем считать достоверными все значения прогнозируемых величин. Коэффициент корреляции данных медицинской статистики и прогноза по данным озонметра составил 0.78. Для заболеваний детей астматическим бронхитом средние квадратичные ошибки одного прогноза составили 12.46 % по данным моделирования и 14.98 % по данным озонметра.

Таким образом, мы также можем считать достоверными все значения прогноза с указанной погрешностью. Коэффициент корреляции данных медицинской статистики по астматическому бронхиту у детей и прогноза по данным озонметра составил 0.76. Заметим, что среднее значение концентрации приземного озона для г. Киева по данным моделирования (UAM-V)

**Прогнозирование заболеваемости системы дыхания населения г. Киева в 2000—2007 гг. (в скобках — ошибка прогнозирования)**

Источник данных	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.
Рейнская модель	—	—	75.0	75.0	55.0	78.5	71.5	90.5
УФ-озонметр	56.9	74.4	75.5	71.1	67.9	84.2	77.0	91.5
Ауга-ОМІ	—	—	—	—	—	63.0	61.9	74.0
<i>Взрослые (болезни СВД)</i>								
Фактически (случаев на 100 000 чел.)	2996	3093	3236	3534	3391	3561	3600	3836
Прогноз по Рейнской модели	—	—	3886 (20 %)	3884 (10 %)	2902 (14 %)	4058 (14 %)	3714 (3 %)	4649 (21 %)
Прогноз по озонметру	2996	3857 (25 %)	3911 (21 %)	3694 (4.5 %)	3537 (4.3 %)	4339 (22 %)	3985 (11 %)	4699 (22 %)
Прогноз по Ауга-ОМІ	—	—	—	—	—	3295 (7 %)	3241 (10 %)	3837 (0.003 %)
<i>Дети (астматический бронхит)</i>								
Фактически (случаев на 1000 чел.)	7.37	8.39	8.75	9.2	7.12	9.2	8.75	—
Прогноз по Рейнской модели	—	—	9.7 (11 %)	9.7 (5.4 %)	9.3 (24 %)	10.1 (11 %)	9.0 (3 %)	—
Прогноз по озонметру	7.69 (4 %)	9.9 (18 %)	11 (26 %)	9.2 (0.0 %)	8.8 (6 %)	10.9 (18 %)	9.95 (14 %)	—
Прогноз по Ауга-ОМІ	—	—	—	—	—	8.8 (8 %)	8.3 (5 %)	—

озонового эпизода в 2000 г. практически совпало со значением, полученным на основе УФ-анализатора озона в Национальном ботаническом саду. Поэтому использование инструментальных показаний концентраций приземного озона является оправданным для прогнозирования заболеваемости СВД как среднего значения для города.

Из таблицы видно, что почти все данные прогноза заболеваемости по рейнской модели и наземному озонметру выше данных медицинской статистики. Причин может быть несколько, и среди них — снижение числа обращений в районные поликлиники (одна часть населения предпочитает лечиться в частных клиниках, другая, малообеспеченная, занимается самолечением). Появились более действенные медицинские препараты, в частности от аллергического астматического бронхита.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема прогнозирования индивидуальных рисков действия приземного озона на здоровье человека стоит в Украине особенно остро, так как действенные реакции государственных структур на проблемы экологии, как правило, значительно отстают от потребностей населения.

Полученные нами результаты позволяют сделать вывод о том, что создание мониторинговой сети измерения приземного озона в крупнейших городах Украины, расширение базы данных относительно загрязнённости приземным озоном атмосферы городов Украины, а также базы статистических данных по состоянию здоровья и специфике заболеваемости населения этих городов — необходимое условие изучения вредного воздействия приземного озона на здоровье людей. В результате проведенной работы стало очевидным, что моделирование приземного озона в городской среде следует повторять хотя бы через каждые 3–4 года для поиска корреляций между концентрациями озона и заболеваемости населения по районам, учитывая темпы развития города, а также изменения количественных характеристик заболеваемости населения озонозависимыми патологиями СВД. Такие исследования в сочетании с данными спутников

и моделированием открывают возможности для прогнозирования рисков вредного воздействия озона на здоровье населения крупных городов Украины.

1. Блюм О. Б., Будак І. В., Дячук В. А., Сосонкін М. Г., Шаврина А. В. Приземний озон у Києві, умови його утворення і стоку // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2002. — Вип. 250. — С. 61–77.
2. Микульська І. О., Шаврина А. В., Кіфоренко С. І. Забрудненість міста Києва приземним озоном як медико-екологічна проблема // Біомедичні інформаційні технології в охороні здоров'я. — Київ, 2008. — С. 41–44.
3. Шаврина А. В., Павленко Я. В., Велесь А. А. и др. Общее содержание озона в тропосфере и тропосферные профили озона над Киевом в 2007 г. // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 5. — С. 85–94.
4. Шаврина А. В., Шеминова В. А., Павленко Я. В. и др. Содержание озона над Киевом в 2005–2008 гг. // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 4. — С. 3–12.
5. Blum O. Long-term monitoring of tropospheric ozone in Kyiv, Ukraine: formation, temporal patterns and potential adverse effects // Proc. NATO Advanced Research Workshop on Ecotoxicology, Ecological Risk Assessment and Multiple Stressors / Eds G. Arapis, et al. — NATO Earth and Environmental Ser., 2006. — 6. — P. 337–344.
6. Blum O., Bytnerowicz A., Manning W. and Popovicheva L. Ambient tropospheric ozone in the Ukrainian Carpathian mountains and Kiev region: detection with passive samplers and bioindicator plants // Environ. Poll. — 1997. — 98, N 3. — P. 299–304.
7. Air pollution by ozone across Europe during summer 2009 // Techn. Rept. — 2010. — N 2. (<http://www.eea.europa.eu/publications/air-pollution-by-ozone-across-europe-during-summer-009>).
8. Lippmann M. Health effects of ozone. A critical review // J. Air Pollut. Contr. Assoc. — 1989. — 39, N 5. — P. 672–695.
9. Shavrina A. V., Pavlenko Ya. V., Veles A. A., et al. Ozone columns obtained by ground-based remote sensing in Kiev for Aura Ozone Measuring Instrument validation // J. Geophys. Res. — 2007. — 112. — D24S45.
10. Shavrina A. V., Sosonkin M. G., Veles A. A., et al. Integrated modelling of surface and tropospheric ozone for Kiev city // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment / Eds I. Barnes, M. M. Kharytonov. — NATO Science for Peace and Security, Ser. C: Environmental Security. — 2008. — 25. — P. 345–357.

11. *Shavrina A. V., Veles A. A., Nochvaj V., et al.* Modelling of Ozone Episode in Kiev Metropolitan Area // NewsLetters of the FP7 EC MEGAPOLI Project. — 2008. — N 8. — P. 31.
12. *Systems Applications International, 1995: Users Guide to the Variable Grid Urban Airshed Model (UAM-V).* — San Rafael, CA, 1995. — 131 p.
13. *White M. C., Etzel R. A., Wilcox W. D., Lloyd C.* Exacerbations of childhood asthma and ozone pollution in Atlanta // *Environ. Res.* — 1994. — **65**. — P. 56—58
14. *WHO Air quality guidelines for Europe.* — 2nd ed. — Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2000. — (WHO Regional Publications, European Ser. N 91).
15. *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Summary of risk assessment. Global update 2005.* — World Health Organization.
16. *Yang Q., Chen Y., Shi Y., et al.* Association between ozone and respiratory admissions among children and the elderly in Vancouver // *Canada. Inhal Toxicol.* — 2003. — **15**. — P. 1297—1308.

Ндійшла до редакції 17.12.10

*A. V. Shavrina, I. A. Mikulskaaya, S. I. Kiforenko, V. A. Sheminova, A. A. Veles, O. B. Blum*

#### THE STUDY OF GROUND-LEVEL OZONE OVER KYIV AND ITS IMPACT ON PUBLIC HEALTH

Ground-level ozone in Kyiv for the episode of its high concentration in August 2000 is simulated with the model of urban air pollution UAM-V. The study of total ozone over Kyiv and of its concentration changes with height in the troposphere is made on the basis of ground-based observations with the infrared Fourier-spectrometer at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine as a part of the ESA-NIVR-KNMI project no 2907. In 2008, the satellite Aura-OMI data OMO3PR on profiles of the atmosphere ozone became available. The data include the ozone content in the lower layer of the atmosphere, beginning in 2005. They can be used for the evaluation of the ground-level ozone concentrations in all cities of Ukraine. Some statistical investigation of ozone air pollution in Kyiv and medical statistics data on respiratory system diseases is carried out with the application of the «Statistica» package. The regression analysis, prognostic regression simulation, and retrospective prognosis of the epidemiological situation with respect to respiratory system pathologies in Kyiv during 2000—2007 are performed.

УДК 681.512:00.467:519.246.8

**Я. И. Зельк, Н. Н. Куцсульт, С. В. Скакун, А. Ю. Шелестов**

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

## **ОЦЕНКА РИСКОВ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕВОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕХНОЛОГИИ СЛИЯНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ**

---

*Поставлена задача оцінки ризиків, пов'язаних з наслідками стихійних лих на основі різномірної геопросторової інформації (даних супутникових, наземних спостережень і даних моделювання) і запропоновано метод її розв'язання. Основною методу є ансамблеве оброблення і технологія злиття гетерогенних даних (data fusion) стосовно оцінювання за вибіркою невідомої густини ймовірності стихійного лиха, що залежить від скінченної кількості параметрів. Проаналізовано джерела різномірних геопросторових даних, що використовуються у створюваному операційному сервісі картографування ризиків затоплень для території Намібії. Розглянуто принципову схему системи оцінювання густини ймовірності для визначення ризику затоплень для території Намібії, побудовану у відповідності до запропонованого методу. На продовження робіт за міжнародним пілотним проектом «Sensor Web Project for Flood Monitoring in Namibia» співробітниками ІКД НАНУ — НКАУ буде створений операційний сервіс картографування ризиків затоплень з використанням сучасних Internet та ГІС технологій, який буде відповідати міжнародним стандартам консорціуму OGC (Open Geospatial Consortium) надання геопросторової інформації.*

---

При прийнятті рішень, касаючихся зашити от воздействия стихийных бедствий на население, социально-экономические объекты и среду, возникает проблема оценивания рисков неблагоприятных последствий от воздействия различных факторов окружающей среды на значительных территориях. Исходная информация для решения проблемы оценивания такого рода рисков содержится в разнородных геопространственных данных (спутниковых, наземных данных моделирования), касающихся конкретного региона, различных характеристик территории, объектов и факторов внешней среды. Мера риска пропорциональна ожидаемым потерям, которые могут быть причинены рисковым событием, и вероятности этого события. В настоящее время в мире есть системы оценки рисков в операционном режиме. Однако используемые в таких операционных системах методы оценки рисков зачастую являются слишком упрощенными. Они не опираются на достаточно развитый матема-

тический аппарат оценки среднего риска по эмпирическим данным, разработанный для задач оценивания качества восстановления функциональных зависимостей на основе эмпирических данных, который применяется в статистической теории обучения [1, 2, 7].

В работе [4] содержится детальный обзор более 25 известных метрик для определения рисков отдельного индивидуума, а также социальных, экономических, рисков для окружающей среды и других, связанных со стихийными бедствиями. В общем случае риск описывается в виде функции вероятности наступления неблагоприятного события и приносимого этим событием ожидаемого ущерба. Во многих странах мира такие метрики оценки рисков стали государственными и отраслевыми стандартами. Они используются при создании информационных продуктов и сервисов для заинтересованных государственных органов предотвращения чрезвычайных ситуаций, органов планирования развития урбанизированных территорий, имущественного и коммунального сектора, страховых компаний. В Украине проблема оценки рисков стихийных

бедствий еще далека от ее постановки на государственном уровне.

В настоящей работе поставлена задача оценки рисков, связанных со стихийными бедствиями на основе разнородной геопространственной информации, предложен и обоснован метод ее решения и приведена принципиальная схема системы оценивания плотности вероятности для определения риска затоплений для территории Намибии, построенная в соответствии с предложенным методом.

Совокупным ожидаемым риском последствий стихийного бедствия (совокупными ожидаемыми потерями) в области  $A$  назовем величину

$$R_A = \iint_A r(x, y) dx dy,$$

где  $r(x, y)$  — локальный ожидаемый риск последствий стихийного бедствия  $z$  (локальные ожидаемые потери) в точке  $(x, y)$ , вычисляемый как математическое ожидание функции ущерба  $h_{x,y}(z)$  последствий в позиции  $(x, y)$ , т. е. как значение функционала среднего риска [1, 2, 7]

$$r(x, y) = \int_0^{\infty} h_{x,y}(z) p_{x,y}(z) dz,$$

где  $p_{x,y}(z)$  — плотность распределения вероятности стихийного бедствия  $z$  в точке  $(x, y)$ , оцениваемая на основе совместного анализа разнородных геопространственных данных. Незвестная плотность вероятностей стихийного бедствия в точке зависит от различных факторов окружающей среды, которые могут быть прямо или косвенно измерены с помощью наземных средств и дистанционных методов, либо получены с помощью моделирования.

Задача восстановления плотности вероятности в классе непрерывных функций сводится к некорректной задаче численного дифференцирования функции распределения вероятностей [7]. Ее можно решать непараметрическими методами (например, метод Парзена, метод упорядоченной минимизации риска с использованием ковариационной матрицы коррелированных ошибок измерения), которые учитывают некорректность задачи и опираются на статистическую теорию регуляризации. Однако в случаях, когда имеется априорная информация об иско-

мой плотности вероятности, можно избежать некорректной постановки этой задачи. В частности, если восстанавливаемая плотность вероятности известна с точностью до конечного числа параметров (что имеет место в нашем случае), задача ее восстановления по эмпирическим данным корректна, и для ее решения можно использовать эффективные методы параметрической статистики. Так, в классе задач минимизации среднего риска, связанном с классификацией (обучением распознаванию образов), восстановление неизвестных параметров плотности распределения вероятности  $p_{x,y}(z)$  возможно различными методами параметрической статистики (в зависимости от контекста задачи): методом максимального правдоподобия, методом наилучших несмещенных приближений, методом Байесовых приближений. Кроме того, можно восстанавливать параметризованную плотность вероятности стихийного бедствия методами статистической теории обучения — нейронные двухслойные сети; ядерные методы — радиальных базисных функций (RBF), метод машин опорных векторов (SVM) и др. [1, 2, 7].

Для оценки плотности вероятности стихийного бедствия необходимо анализировать (классифицировать) информацию, поступающую из различных источников с различным временным и пространственным разрешением. Совместный анализ такой информации выполняется с применением ансамблевого подхода [3] и реализацией методов и технологий слияния данных (data fusion) [5, 6].

Предлагаемая система для оценивания плотности вероятности стихийного бедствия  $p_{x,y}(z)$  состоит из ансамбля отдельных («слабых») классификаторов (решающих правил), каждый из которых обеспечивает результат анализа данных одного или нескольких источников. Агрегированные в систему ансамблевой обработки данных, отдельные классификаторы составляют ансамбль экспертов («сильный» классификатор), мнения которых с соответствующими весами учитываются в блоке слияния, на выходе которого в результате реализации машинного обучения получается с высокой точностью оценка плотности вероятности стихийного бедствия.

Преимуществом ансамблевого метода классификации является возможность повышения точности классификации за счет приема «усиления» (boosting), который сводится к оценке функции потерь (ошибки классификации) и минимизации этой функции путем добавления новых компонентных классификаторов до тех пор, пока очередное добавление не перестанет снижать значение функции потерь.

Работы по созданию системы оценки рисков на основе разнородной геопространственной информации проводятся в рамках международного пилотного проекта «Sensor Web Project for Flood Monitoring in Namibia», выполняемого по инициативе платформы ООН UN-SPIDER ведущими космическими агентствами: NASA, NOAA, DLR при участии Института космических исследований НАН Украины и НКА Украины (ИКИ НАНУ-НКАУ). Для оценки риска затоплений для территории Намибии используются следующие разнородные источники данных.

#### 1. Спутниковые данные:

- радиолокационные: Envisat/ASAR — среднего пространственного разрешения (150 м) (продукты обработки поставляются в течение 24 ч после получения данных), высокого пространственного разрешения (30 м) (продукты поставляются по запросу), RADARSAT-2 (по запросу в рамках Международной хартии «Space and Major Disasters» или рабочей группы по чрезвычайным ситуациям комитета GEO) — высокого пространственного разрешения (от 3 до 30 м);

- оптические: Envisat/MERIS — среднего пространственного разрешения (300 м), Terra и Aqua/MODIS — среднего пространственного разрешения (250 м — 1 км), EO-1 (NASA) — высокого пространственного разрешения (30 м);

- данные мониторинга уровня осадков, получаемые со спутников в рамках совместной миссии NASA и JAXA Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), оснащенных радаром, приемниками микроволнового диапазона, видимого и инфракрасного диапазона.

#### 2. Данные математического моделирования:

- метеорологические, полученные с использованием численной мезомасштабной модели прогнозирования погоды WRF — с простран-

ственным разрешением 30 км (может быть улучшено до 1 км); для задания начальных условий используется глобальная модель (система) прогнозирования GFS;

- гидрологические — о водосборном бассейне рек, предоставляемые Министерством сельского хозяйства, водных ресурсов и сельского хозяйства Намибии.

3. Данные наземных наблюдений о текущих и архивных значениях уровня осадков и уровня стока для каждого водосборного бассейна.

4. Статистические данные об уровне осадков, уровне стока, данные спутников Terra и Aqua/MODIS для статистического анализа карт затоплений за предыдущие годы, начиная с 1999 г., предоставляемые Dartmouth Flood Observatory.

Продукты обработки поставляются в форматах KML (для визуализации в Google Earth), GeoTiff, WMS и др.

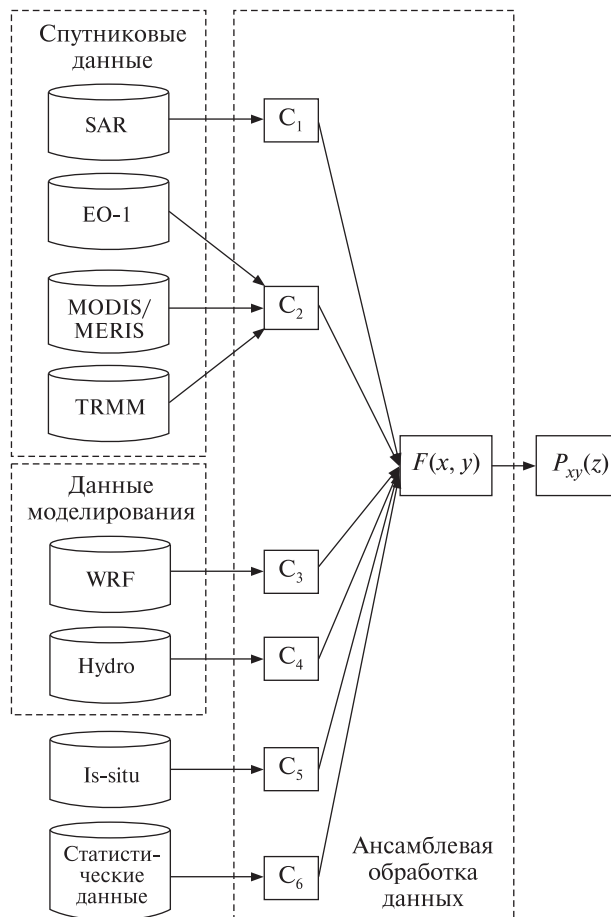
Принципиальная схема системы оценивания плотности вероятности для определения риска затоплений для территории Намибии представлена на рисунке. Для ансамблевой обработки спутниковых данных используются нейросетевой ( $C_1$ ) и пороговый ( $C_2$ ) классификаторы. Для обработки данных математического моделирования — предсказатель  $C_3$  временных рядов количества осадков, пороговый классификатор  $C_4$  водосборного бассейна. Для классификации данных, полученных в месте нахождения (*in-situ*), и разнообразных статистических данных используются пороговый классификатор  $C_5$  количества осадков и уровня стока и классификатор  $C_6$  по методу максимума правдоподобия.

В настоящее время в рамках международного пилотного проекта «Sensor Web Project for Flood Monitoring in Namibia» сотрудниками ИКИ НАНУ-НКАУ осуществляется обработка спутниковых снимков и создание карт потенциальных затоплений на основании слияния разнородных геопространственных данных. Был создан соответствующий Web-интерфейс пилотной версии разрабатываемой системы мониторинга наводнений для территории Намибии. В будущем создаваемая система мониторинга паводков в Намибии будет снабжена операционными сервисом картографирования рисков затоплений,

который будет функционировать на основе предложенного метода.

Работы по созданию системы раннего предупреждения наводнений на базе технологии SensorWeb (Flood SensorWeb Early Warning System) в рамках пилотного проекта, выполняемого при международном партнерстве NASA, платформы ООН UN-SPIDER, Намибийского департамента гидрологии, Канадского космического агентства, Института космических исследований НАН Украины и НКА Украины, Немецкого космического агентства (DRL) и др. демонстрируются сайтом <http://sensorweb.nasa.gov/NamibiaFlood.html>. В продолжение этих работ сотрудниками ИКИ НАНУ-НКАУ будет создан операционный сервис картографирования рисков затоплений с использованием современных интернет- и ГИС-технологий, который будет соответствовать международным стандартам консорциума OGC (Open Geospatial Consortium) предоставления геопространственной информации.

Таким образом, предложен интегрированный подход к оцениванию различных видов риска, связанных с чрезвычайными ситуациями природного характера на основе разнородной геопространственной информации. Подход базируется на применении статистической теории обучения и предполагает использование ансамбля классификаторов для определения плотности вероятности стихийного бедствия. Преимуществом предложенного подхода является более высокая точность определения риска при использовании оптимальной сложности модели ансамблевой обработки данных, чем при использовании каждого из классификаторов определенного типа геопространственных данных в отдельности. Проанализированы источники разнородных геопространственных данных, используемые в создаваемом операционном сервисе картографирования рисков затоплений для территории Намибии. Рассмотрена принципиальная схема системы оценивания плотности вероятности для определения риска затоплений для территории Намибии, построенная в соответствии с предложенным методом. В продолжение работ по международному пилотному проекту «Sensor Web Project for Flood Monitoring



Принципиальная схема системы оценивания плотности вероятности для определения риска затоплений для территории Намибии (см. текст)

in Namibia» сотрудниками ИКИ НАНУ-НКАУ будет создан операционный сервис картографирования рисков затоплений с использованием современных Internet и ГИС технологий, который будет соответствовать международным стандартам консорциума OGC (Open Geospatial Consortium) предоставления геопространственной информации.

1. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. — New York: Springer, 2006. — 738 p.
2. Haykin S. Neural networks. A comprehensive foundation. — New Jersey: Prentice Hall, 1, 1994. — 768 p.
3. Jaakkola T. Course materials for 6.867 machine learning, Fall 2006. MIT OpenCourseWare, Massachusetts Institute of Technology. — 10 p. (<http://ocw.mit.edu/>).

4. Jonkman S. N., van Gelder P. H. A. J. M., Vrijling J. K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage // J. Hazardous Materials. — 2003. — A99. — P. 1—30.
5. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid and sensor web technologies for environmental monitoring // Earth Sci. Informatics. — 2009. — 2, N 1-2. — P. 37—51.
6. Mitchell H. B. Multi-sensor data fusion — An introduction — Berlin, Springer-Verlag, 2007. — 282 p.
7. Vapnik V. Statistical learning theory. — New York: Wiley, 1998. — 740 p.

*Надійшла до редакції 17.12.10*

*Ya. I. Zelyk, N. M. Kussul', S. V. Skakun, A. Yu. Shelestov*

#### NATURAL DISASTER RISK ASSESSMENT BASED ON THE ENSEMBLE PROCESSING AND TECHNOLOGY OF HETEROGENEOUS GEOSPATIAL DATA FUSION

The natural disaster risk assessment problem is stated which is based on heterogeneous geospatial data, namely, satel-

lite data, ground-based observations and simulation data. A method for solving the problem is proposed. The heart of the method is the ensemble data processing and technology of the heterogeneous data fusion with respect to the unknown disaster probability density estimation based on a sample of data. This probability density depends on the finite number of parameters. The sources of heterogeneous geospatial data are analyzed which are used in the developed operational flooding risk mapping service for the territory of Namibia. We consider a conceptual sketch of the probability density estimation system to determine the flooding risk for the territory of Namibia. It is constructed in accordance with the method proposed. To continue the investigation according to the international pilot project «Sensor Web Project for Flood Monitoring in Namibia», the staff of SRI NASU-NSAU will elaborate an operational flood risk mapping service with the use of modern Internet and GIS technologies. The operational service will satisfy the international standards of Open Geospatial Consortium (OGC) to provide geospatial information.



УДК 528.855+681.7

**Ю. В. Беляев, Ю. А. Крот, Л. В. Катковский, А. В. Роговец, С. В. Хвалей**

Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченка  
Білоруського державного університету, Мінськ, Білорусь

## **ОРГАНИЗАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕЛОРУССКОГО ПОДСПУТНИКОВОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ПОЛЕТНЫХ КАЛИБРОВОК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

---

*Розглядаються питання, пов'язані з організацією та подальшим використанням на території Республіки Білорусь підспутникового полігону, організованого на базі учбової географічної станції «Західна Березіна» для забезпечення наземного обслуговування Білоруської космічної системи дистанційного зондування.*

---

### **ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ ПОЛИГОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

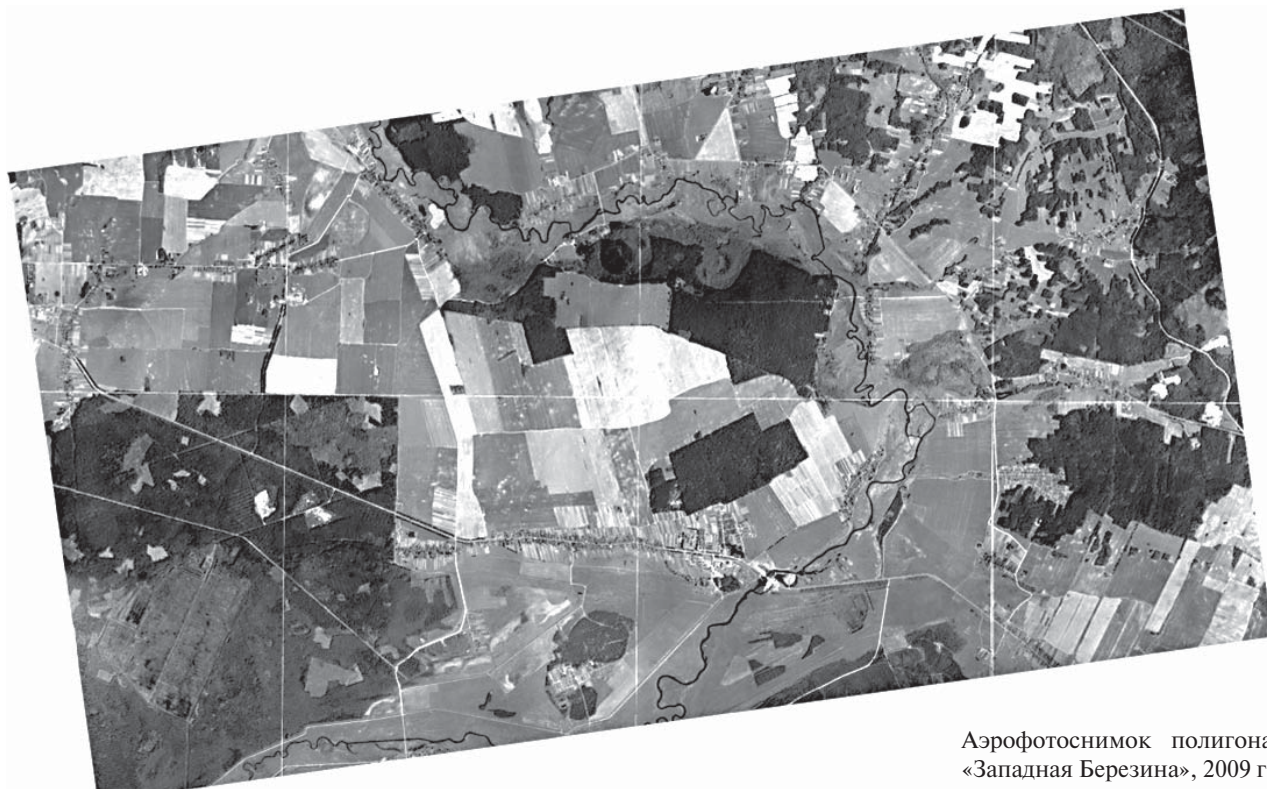
По мере разработки и создания оптоэлектронных систем, предназначенных для долговременного функционирования в условиях космического полета, встает важнейшая задача радиометрических калибровок указанных систем на борту космического носителя по абсолютным значениям яркости или потока регистрируемого излучения [8, 9]. Существенное место при этом отводится измерениям на подспутниковых полигонах.

В задачи полигонного обслуживания входят: верификация (проверка) географической привязки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), валидация (подтверждение заданных значений) параметров сенсоров, верификация методик ДЗЗ и результатов интерпретации данных; обеспечение наземными данными разработки новых средств ДЗЗ и дешифрирования его результатов, математическое планирование эксперимента; проведение синхронных и многоуровневых экспериментов [3]. С этой целью на полигонах закладываются репера, тестовые и эталонные участки [2, 3].

На полигоне-стационаре, обеспечивающем решение задач полигонов всех типов (калибровочно-реперных, эталонных, тематических) в непрерывном (круглосуточно-круглогодичном) режиме [4], должны быть представлены эталонные объекты различной природы и назначения: точечные объекты для субпиксельной привязки данных дистанционных измерений; объекты для валидации разрешающей способности орбитальных средств, геометрической коррекции и калибровки (миры, бетонные реперы известной формы и размеров); сосредоточенные и распределенные активные и пассивные калибровочные средства и реперы оптического диапазона (отражательные, цветные и поляризационные реперы, основные типы почв, асфальтовые покрытия, водные реперы); эталонные участки монокультур древостоев и сельскохозяйственной растительности.

Также должны быть организованы непрерывные фенологические и метеонаблюдения, мониторинг состава воздуха, измерение и анализ состава осадков, отбор и анализ почв и другие общие наблюдения.

Общее описание полигона включает в себя ГИС на следующей картографической основе: топографическая, геологическая карты, карты земле- и лесоустройства, рельефа, сельскохозяйственных угодий и др. Специальное описание по-



Аэрофотоснимок полигона «Западная Березина», 2009 г.

лигона включает описание на основе авторских методик, адекватных задачам ДЗЗ, территории стационара и тестовых площадок в теле полигона различной природной этимологии [2, 3].

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДСПУТНИКОВОГО ПОЛИГОНА «ЗАПАДНАЯ БЕРЕЗИНА»

Полигон-стационар «Западная Березина» создается в рамках программы Союзного государства «Космос-НТ» с целью обеспечения наземного обслуживания Белорусской космической системы дистанционного зондирования в интересах решения хозяйственных и прикладных задач

Таблица 1. Координаты углов полигона «Западная Березина»

Углы	Широта	Долгота
Верхний левый	54° 08' 51.45" N	26° 15' 48.28" E
Верхний правый	54° 09' 57.02" N	26° 28' 14.64" E
Нижний левый	54° 04' 57.72" N	26° 16' 48.37" E
Нижний правый	54° 06' 03.01" N	26° 29' 13.23" E

Беларуси. Данный полигон войдет в международную систему полигонов-стационаров, создаваемую в настоящее время на территории стран СНГ.

В первую очередь подспутниковый полигон необходим для проведения калибровки Белорусского космического аппарата (БКА). Основной задачей полигона является получение данных для проведения калибровки оптической аппаратуры БКА в видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн. На полигоне планируется проводить синхронные измерения как минимум на двух уровнях — наземном и авиационном. В создании подспутникового полигона участвует несколько белорусских организаций, выполняющих различные задачи. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета разрабатывает методики и аппаратуру для проведения полетных калибровок космических аппаратов [1].

Полигон находится на территории учебной географической станции «Западная Березина»

географического факультета Белорусского государственного университета и представляет собой прямоугольник площадью 100 км<sup>2</sup>, ориентированный на 98° к экватору согласно наклону орбиты БКА (см. табл. 1). Выбор участка для размещения полигона основывается на том, что учебная станция имеет соответствующую инфраструктуру для обеспечения работ и возможности для ежегодного обновления информации.

В геологическом отношении участок приурочен приподнятой части по поверхности кристаллического фундамента Белорусской антеклизы. Почвенный покров характеризуется развитием подзолистых почв разного генезиса. Рельеф представлен моренными, водно-ледниковыми, пойменными и другими образованиями. Растительный покров представлен геоботанической подзоной дубово-темнохвойных лесов, лесной покров — сосново-еловыми средневозрастными и приспевающими насаждениями, луговая растительность — мелкозлаковыми и мелкотравными травостоями.

Из водных объектов необходимо отметить Соковичское водохранилище и долину реки Западная Березина. Здесь представлены самые разные формы и виды рельефа, пойма реки, сама река со старицами, водохранилище, холмисто-моренный рельеф, лес, луг, сельскохозяйственные земли.

Для дешифрирования видов земель полигона Белорусским предприятием сельскохозяйственных и аэрофотогеодезических изысканий была проведена аэрофотосъемка с пространственным разрешением не хуже 30 см (рисунок). После обработки аэрофотоснимка установлено, что на территории полигона представлено более 20 подвидов различных подстилающих поверхностей. Лесные массивы, пахотные земли и луга представлены в равных долях (около 25 % от общей площади каждая).

#### **ТРЕБОВАНИЯ К КАЛИБРОВочНЫМ И ТЕСТОВЫМ УЧАСТКАМ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

Эталонные площадки для спектрально-энергетических калибровок орбитальных приборов должны обладать однородностью отражатель-

ных характеристик на всей площади, чтобы перекрывать мгновенное поле зрения съемочной системы.

На современных полигонах пассивные оптические репера представлены как однородными участками подстилающей поверхности (монокультур растительности, леса и т. п.) так и искусственными полотнищами (разноцветными лавсановыми покрытиями, устанавливаемыми под разными углами). Минимальный размер площадки выбирается как сумма величины элемента разрешения  $l$  и радиуса помехи бокового подсвета для заданной погрешности яркости объекта (желательно не менее  $3l$ ).

Смысл выбора различных эталонных площадок состоит в том, что должны быть представлены поверхности, совокупность которых как можно подробнее и равномернее представляет весь диапазон значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) — от 0 до 1 — в каждом канале съемочной системы. Поэтому целесообразно включать в состав площадок следующие объекты: водный репер (искусственный или естественный); реперы различных типов подстилающей поверхности (почвенные ямы, асфальтовые покрытия и др.) с глубинными датчиками температуры и влажности; эталонные площадки сельскохозяйственных культур и монокультур древесной растительности.

Поскольку для естественных реперов практически невозможно поддерживать неизменными их оптические характеристики достаточно длительное время, поэтому их целесообразно использовать в синхронных многоуровневых измерениях.

Тестовые участки, выбираются таким образом, чтобы выборка была репрезентативная и охватывала все виды подстилающих поверхностей. При выборе естественных участков необходимо учитывать особенности спектральных характеристик отражения объектов. Кривые КСЯ в видимой области у растительных объектов в вегетативный период имеют примерно одни и те же закономерности, что обусловлено в основном хлорофиллом. Для растительности характерна форма кривых КСЯ с максимумом в зеленой зоне спектра 540—580 нм и минимумом в сине-

фиолетовой 400—470 нм и красной 680—690 нм зонах спектра.

Оптические характеристики различных растений не идентичны и определяются составом и состоянием пигментов, растительных и покровных тканей, морфологией растения в целом, возрастом, экологическими условиями. Неодинаковы и отражательные свойства различных частей растений, их совокупностей. Эти различия более четко выражены в узких зонах спектра. Растения, произрастающие в благоприятных условиях, характеризуются меньшими КСЯ, а их спектральные кривые имеют более четко выраженный характер в зеленой зоне спектра. С ухудшением условий коэффициенты яркости растений, как правило, возрастают. Более высокие КСЯ у растений, произрастающих в условиях меньшей освещенности.

В ИК-области спектра различия в спектральной яркости крон основных древесных пород более значительны. В связи с этим при съемке в инфракрасной области спектра тоновые различия между группами древесных пород более существенны. В частности, эти различия надежно позволяют различать хвойные породы от лиственных, здоровые деревья от поврежденных. При применении методов компьютерного анализа и классификации спектров и изображений возможно установление достаточно большого числа градаций состояния объекта [6].

#### АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ И АВИАЦИОННЫХ СЪЕМОК КАЛИБРОВОЧНЫХ УЧАСТКОВ ПОЛИГОНА

К спектральной аппаратуре, обеспечивающей полетные калибровки наземными данными, предъявляются повышенные требования по точ-

ности спектрально-угловых измерений отраженного излучения.

Для обеспечения наземных измерений на полигоне «Западная Березина» используются спектро-радиометры собственной разработки: портативный спектро-радиометр МС-12 на область спектра 0.35—1.05 мкм и полевой спектро-радиометр ПСР-02 на область 0.35—2.5 мкм (см. табл. 2).

Оба прибора предназначены для измерений спектрально-угловых и поляризационных характеристик излучения, отражения (рассеяния), пропускания и люминесценции разнообразных природных и искусственных объектов и сред [5, 6]. В сочетании с дополнительным набором оборудования (сменные объективы, световодные и поляризационные насадки) обеспечивают высокоточные абсолютные измерения и экспресс-анализ спектров, как в лабораторных, так и в полевых условиях при дистанционном зондировании со стационарных точек и подвижных (авиационных) носителей. Спектрометры откалиброваны по абсолютным значениям СПЭЯ в аттестованной лаборатории НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ на метрологическом комплексе «Камелия-М» [7].

Радиометрические погрешности наземной аппаратуры должны быть меньше соответствующих погрешностей космических съемочных систем: Погрешности измерения КСЯ подстилающих поверхностей спектро-радиометров МС-12 и ПСР-02 составляют 5—10 %, погрешность измерения угловых характеристик  $\pm 2^\circ$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На текущем этапе работ по организации подспутникового полигона «Западная Березина» проведено его полное обследование, выбраны участки, потенциально пригодные в качестве ка-

Таблица 2. Характеристики спектро-радиометров для проведения измерений на полигоне «Западная Березина»

Спектро-радиометр	Рабочий диапазон, мкм	Спектральное разрешение, нм	Разрядность АЦП, бит	Питание
МС-12	0.35—1.05	2	12	от портативного компьютера через USB-порт
ПСР-02	0.35—2.5:			от аккумулятора 12 В
	0.35—1.1	2.5	12	
	1.1—2.5	10	16	

либровочных, и проведены измерения оптических характеристик этих участков. Осуществлена обработка результатов измерений, на основании которой получены спектральные коэффициенты яркости исследуемых объектов. Установлено, что наиболее подходящими в качестве калибровочных площадок могут быть участки песчаных карьеров, торфяников, река Березина, отдельные участки леса и луга, асфальтовые площадки, крыши зданий на территории географической станции, обладающие стабильными спектральными характеристиками.

1. *Атрошенко Л. М., Беляев Ю. В., Катковский Л. В. и др.* Организация подспутникового полигона «Западная Березина» для полетных калибровок съемочных систем космических аппаратов // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: матеріали доповідей: (м. Київ, 2010 р.). — К.: Освіта України, 2010. — С. 35.
2. *Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Катковский Л. В.* Состав реперов и калибровочных средств оптического и радиодиапазонов подспутниковых полигонов // Четвертый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса, Минск, 27—29 окт. 2009 г.: в 2 т. / ОИПИ НАН Беларуси; редкол.: А. В. Тузиков [и др.]. — Минск, 2009. — Т. 2. — С. 20—24.
3. *Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И. и др.* Подспутниковые полигоны Украины // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. — М.: Ин-т космич. исслед. РАН, 2008. — Том II. — С. 265—271.
4. *Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И. и др.* Подспутниковые полигоны обеспечения надежности результатов ДЗЗ [Электронный ресурс] // ДНВЦ «Природа»: [сайт]. — 2004—2009. — Режим доступа: <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=1208>.
5. *Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Катковский Л. В. и др.* Оценка и анализ параметров полевого спектрорадиометра на область спектра 350—2500 нм // Журн. прикладной спектроскопии. — 2009. — **76**, № 5. — С. 607—614.
6. *Беляев Б. И., Катковский Л. В.* Оптическое дистанционное зондирование. — Минск: БГУ, 2006. — 455 с.
7. *Беляев Ю. В., Катковский Л. В., Роговец А. В. и др.* Методические аспекты спектрально-энергетических калибровок оптической аппаратуры // Информационные технологии, электронные приборы и системы (ITEDS'2010): Матер. Междунар. научно-практ. конф., 6—7 апреля 2010 г., Минск. — Минск: Нац. биб-ка Беларуси, 2010. — С. 227—232.
8. *Slater P. N., Biggar S. F., Holm R. G., et al.* Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors // Remote Sens. Environ. — 1987. — **22**. — P. 11—37.
9. *Teillet P. M., Slater P. N., Ding Y., et al.* Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight // Remote Sens. Environ. — 1990. — **31**. — P. 105—120.

Надійшла до редакції 17.12.10

*Yu. V. Belyaev, Yu. A. Krot, L. V. Katkovsky,  
A. V. Rogovets, S. V. Khvalei*

#### INITIATION AND APPLICATION OF BELARUSIAN SUBSATELLITE TEST SITE FOR IN-FLIGHT CALIBRATION OF SPACE OPTICAL SYSTEMS

We describe some questions involving the initiation and future application of the subsatellite test site within the territory of the Republic of Belarus. The subsatellite test site is organized on the basis of the educational geographic station «Zapadnaia Berezina» with the aim of ground service of the Belarusian remote sensing space system.

УДК 524.7-77

А. Е. Вольвач<sup>1</sup>, Н. С. Кардашев<sup>2</sup>, М. Г. Ларионов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», с. Наукове, Крим

<sup>2</sup> Астрокосмічний центр Установи Російської академії наук Фізичного інституту ім. П. Н. Лебедева, Москва, Росія

## RT-22 КРАО: ПОДГОТОВКА НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ И ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВЫХ НАЗЕМНЫХ РСДБ-ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РАМКАХ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН»

*Наземно-космічна наукова програма «РадиоАстрон» передбачає проведення досліджень з високим (мікросекунди дуги) кутовим розрізненням морфології і динаміки навколоядерних областей джерел, де відбувається могутнє енерговиділення. Відповідно до наукової кооперації між Україною і Росією ця робота проводиться з використанням 22-м радіотелескопа міліметрового діапазону довжин хвиль RT-22 НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія». Програмою досліджень передбачене проведення робіт з високочутливими радіометрами на частоти 22 і 36.8 ГГц. Це дозволяє одержати спектральні характеристики джерел поблизу частоти 22 ГГц — основної частоти експерименту «РадиоАстрон». Для реалізації проекту підготовляється наукова програма, істотною частиною якої є дослідження компактних утворень усередині позагалактичних джерел і проводяться тестові наземні РНДБ-експерименти.*

### ФОРМИРОВАНИЕ КАТАЛОГА «РАДИОАСТРОН»

В рамках подготовки научной программы проекта был составлен предварительный каталог радиоисточников, по прогнозам имеющих избытки плотности потока на высоких частотах [2, 9]. Это так называемые объекты с инвертированными спектрами излучения. Такие объекты представляют интерес для космической программы из-за того, что содержат очень компактные области, несущие основную долю потока радиоисточника.

Каталог радиоисточников для полетной программы «РадиоАстрон» формировался на основе уточнения спектральных характеристик источников предварительного каталога по данным наблюдений на RT-22 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» на частотах 22 и 36.8 ГГц.

**Измерения потоков выборки радиоисточников из каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36.8 ГГц.** Измерения плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» были выполнены на частотах 22 и 36.8 ГГц с помощью 22-м радиотелескопа RT-22

в соответствии с кооперационной программой исследований России и Украины по космическому проекту «РадиоАстрон». Значительная доля исследуемых источников представляла собой слабые объекты с потоком менее 1 Ян на указанных частотах, поэтому наблюдения данных объектов — длительная и кропотливая процедура, требующая применения специальных методик. Наблюдения на обеих частотах проводились при помощи модуляционных радиометров. Калибровка и корректировка потоков источников проводилась с использованием стандартных процедур «привязки» по калибровочным источникам и учетов изменения параметров антенны в зависимости от азимута и угла места.

**Построение статистических зависимостей « $\log N - \log S$ » и «число источников с инвертированными спектрами — поток».** Во время наблюдений на двух частотах были получены данные по спектральным характеристикам источников в миллиметровом диапазоне длин волн. Объекты, по спектральным характеристикам не удовлетворяющие критерию компактных источников, удалялись из списка. Для количественной оценки неполноты полученного списка радиоисточников строилась экстраполированная за-

висимость подсчетов числа источников (« $\log N - \log S$ ») на частоте 22 ГГц [10] (рис. 1). Сравнивая плотности источников в результирующем каталоге «РадиоАстрон» и полученные на основе построенной зависимости « $\log N - \log S$ », а также числа источников с инвертированными спектрами на частоте 22 ГГц (рис. 2), можно оценить предполагаемое число объектов с указанными спектральными характеристиками на северном небе до потока 0.25 Ян.

Результаты вычислений с использованием указанных зависимостей приводят к следующим выводам. Число источников на частоте 22 ГГц с потоками  $S \geq 0.25$  Ян для северного неба (6.28 стер) составляет  $1860 \pm 20$ . С использованием зависимости «число источников с инвертированными спектрами — поток» можно ожидать наличия в общем списке источников около 1/3 объектов с инвертированными спектрами (для северного неба — 620 источников). Это означает, что в начальном списке из 1250 источников может находиться около половины объектов, имеющих отрицательные спектральные индексы на частоте 22 ГГц и не удовлетворяющих критерию компактных объектов. Данные источники исключались из начального списка в результате спектральных наблюдений на 22 и 36.8 ГГц.

**Сравнение оптических и радиосвойств источников каталога «РадиоАстрон».** Для исследования оптических свойств радиоисточников каталога «РадиоАстрон» по сравнению с объектами, представляющими собой полные выборки источников в радиодиапазоне, проведен сравнительный анализ оптических и радиохарактеристик источников каталога. Использовалась выборка радиоисточников каталога «РадиоАстрон» в диапазоне склонений  $0-20^\circ$ , общая с исследованными радиоисточниками обзора 87 GB. Использовалась выборка радиоисточников в диапазоне склонений  $0-20^\circ$ , общая с исследованными радиоисточниками обзора 87 GB. Полнота последнего равна 50—100 мЯн, что в 2.5—5 раз ниже уровня потока для выборки радиоисточников в каталоге «РадиоАстрон».

В каталог «РадиоАстрон» были отобраны объекты с инвертированными спектрами с потоками более 250 мЯн. Количество оптически отожд-

ествленных источников в каталоге «РадиоАстрон» возросло до 75 % (против 38 % в выборке 87 GB). Это указывает на то, что в среднем выборка объектов каталога «РадиоАстрон» содержит более мощные источники по сравнению с полной выборкой 87 GB, что вполне естественно, так как в подавляющем большинстве это активные ядра галактик.

Количество отождествленных галактик оказалось в шесть раз меньше по сравнению со звездными объектами. Все объекты в оптическом диапазоне имеют субсекундные размеры, что определяется в основном разрешением оптического телескопа. За счет изменения выборки, а не за счет эволюции за период наблюдений, претерпели изменения и цветовые характеристики звездных источников — их цвет из нейтрального переместился в сторону красного. Этот эффект, возможно, связан с изменением эволюционных свойств источников в выборке каталога «РадиоАстрон», где доля удаленных и мощных источников выше.

Полученные результаты по изменению свойств источников каталога «РадиоАстрон» указывают, что наряду с работой «центральной маши-

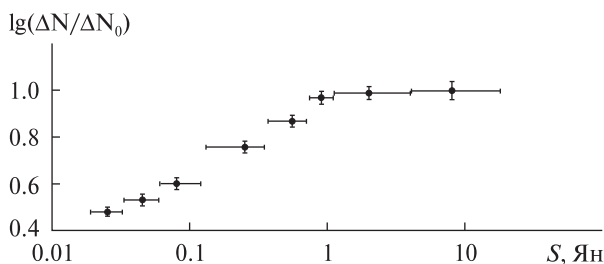


Рис. 1. Дифференциальная зависимость подсчета источников

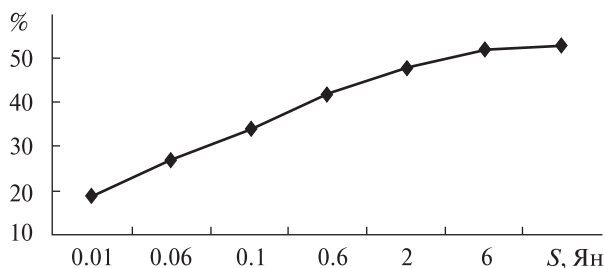


Рис. 2. Доля источников с инвертированными спектрами

ны» в космологически удаленных источниках активные процессы звездообразования в околоядерных областях поставляют значительную пылевую составляющую. За счет этого может трансформироваться и цвет источников. Наличие одновременно вспышек звездообразования и активности в ядрах может служить косвенным указанием на космологическую удаленность объектов, так как увеличение скорости звездообразования напрямую связано с увеличением красного смещения источников.

Таким образом, оптические свойства источников каталога «РадиоАстрон» заметным образом отличаются от средних характеристик объектов полной выборки в радиодиапазоне. А часть из 25 % неотожествленных радиоисточников могут представлять собой сильно удаленные объекты с пылевыми коконами, препятствующими их выделению в оптике на уровне  $21^m$ . Около 50 % источников в списке «РадиоАстрон», как уже упоминалось, могут иметь отрицательные спектральные индексы и принадлежать к классу радиогалактик и компактных галактик и быть оптически более слабыми чем  $21^m$  [10].

**Измерения потоков выборки 110 радиоисточников из каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36.8 ГГц.** Выполнены измерения плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36.8 ГГц с помощью радиотелескопа РТ-22. На первом этапе выполнены наблюдения 110 радиоисточников из предварительного списка «РадиоАстрон» [10].

Полученное среднее значение спектрального индекса для всех источников оказалось равным  $\alpha_{\text{cp}} = -0.01$ . Подобное значение получено и для источников каталога WMAP. Разница заключается в том, что исследуемая выборка имеет существенно более низкий средний уровень потоков, чем выборка WMAP, и, следовательно, если бы она была полной, то среднее значение спектрального индекса  $\alpha_{\text{cp}}$  было бы отрицательным в силу зависимости  $\alpha_{\text{cp}}$  от потока. Благодаря методике отбора источников в каталог «РадиоАстрон» в нем оказалось больше источников с инвертированными спектрами, чем в полной выборке при данном значении среднего потока.

Наличие в исследуемом каталоге радиоисточников значительного количества объектов с отрицательными спектральными индексами не явилось неожиданностью. Определенная часть источников, имеющих инвертированные спектры на дм- и см-длинах волн, на мм-длинах волн обнаруживает уменьшение спектральной плотности потока с частотой. Это видно на примере известных объектов 0316+413, 1226+023, 1334-127, 1611+343 и ряде других. Именно частотный диапазон 20—40 ГГц является переходным от радио- к субмиллиметровым волнам и далее к оптическим. И если спектр интерполируется единой зависимостью, как в перечисленных источниках, то наблюдаемое уменьшение плотности потока представляется естественным, как и полученный нами результат по среднему спектральному индексу источников рассматриваемой выборки.

На рис. 3 приведена гистограмма распределения спектральных индексов измеренной выборки источников. Как и следовало ожидать, полученное распределение схоже с распределением спектральных индексов радиоисточников каталога WMAP, где также среднее значение спектрального индекса  $\alpha_{\text{cp}}$  близко к нулю. Однако дисперсия распределения больше за счет отбора источников, имеющих инвертированные спектры.

**Исследование источников каталога WMAP.** Каталог WMAP, полученный с космического аппарата, включает в себя сильные радиоисточники на небе (более 1.5 Ян). Представляло интерес сравнить спектральные характеристики и параметры переменности потоков излучения источников каталога WMAP и объектами результирующего каталога «РадиоАстрон». Для этой цели с использованием радиотелескопа РТ-22 НИИ КраО на частотах 22 и 36.8 ГГц получены наблюдательные данные полной выборки радиоисточников каталога WMAP для положительных склонений [4].

Полученный каталог РТ-22 содержит данные по потокам источников на указанных частотах, спектральные индексы между двумя частотами для 167 объектов северного неба. В процессе проведения наблюдений в нескольких источниках были зафиксированы вспышки, которые



привели к резкому изменению потоков и спектральных индексов. Распределение спектральных индексов источников в оригинальном каталоге WMAP и в каталоге РТ-22 (рис. 4) имеет схожую форму и дисперсию, что может свидетельствовать о подобии средних характеристик выборки, полученной из наблюдений мгновенных спектров источников и независимых наблюдений с разнесением по времени на разных частотах.

Как и при наблюдениях с космического аппарата WMAP полученный средний спектральный индекс полной выборки источников близок к нулевому значению. Характер распределения спектральных индексов указывает на то, что основная часть объектов имеет плоские и инвертированные спектры.

Сравнение полученных данных с экстраполированными значениями с низких частот показывает совпадение усредненных характеристик выборки на фоне значительного отличия индивидуальных параметров для каждого источника. Это связано с тем, что около половины объектов на высоких частотах имеют искривленные спектры.

Поведение статистической зависимости « $\log N - \log S$ » подтверждает вывод о том, что основную долю объектов высокочастотных обзоров на уровнях потоков 1 Ян и больше представляют квазары и связанные с ними активные галактические ядра. Статистика оптических отождествлений полностью согласуется с указанным выводом. Как следствие состава популяций в обзоре подавляющая доля объектов являются переменными источниками. Уровень переменности находится в обратной зависимости от ее амплитуды.

**Внутренние структуры и физические характеристики АЯГ.** 1. По полученным экспериментальным данным долговременного мониторинга потоков АЯГ определен класс объектов, состоящих из двух тесных сверхмассивных черных дыр и центрального аккреционного диска. Оценено время жизни ДСЧД до слияния, которое может указывать на то, что системы находятся на фазе эволюции, близкой к слиянию. С целью поиска периодических составляющих изменений потоков излучения выполнен гармонический анализ наблюдательных рядов данных. Впервые полу-

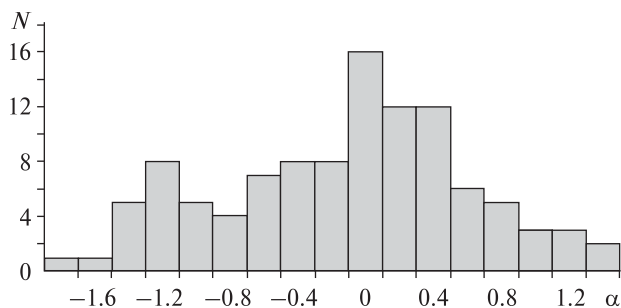


Рис. 3. Распределение числа радиоисточников в зависимости от спектрального индекса

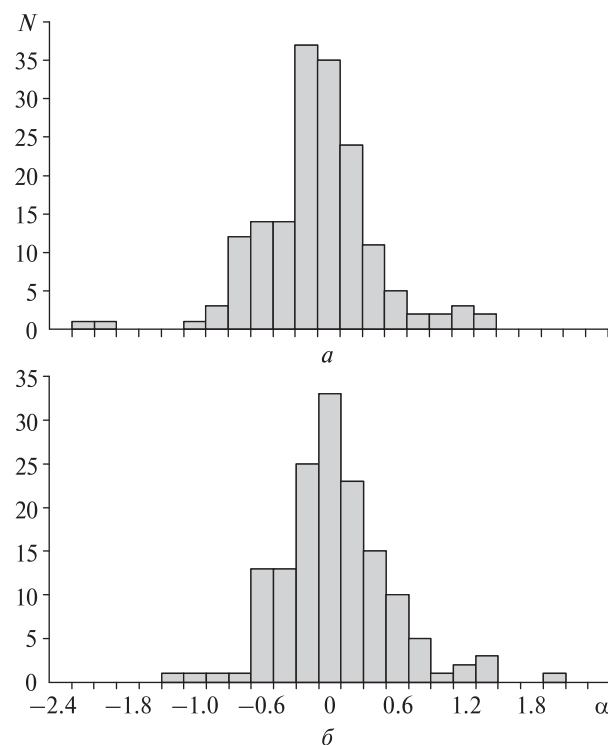


Рис. 4. Распределение источников по значениям спектральных индексов  $\alpha$ : а — РТ-22, б — WMAP

чены параметры орбит компаньонов двойных систем, периоды прецессии центральных тел и время жизни до слияния АЯГ 0716+714, 3С454.3, 3С120, 1308+326, ОJ287, ВL Лас. Показано, что в рассмотренной модели есть ограниченный диапазон допустимых значений радиусов орбит компаньонов от  $3 \cdot 10^{16}$  до  $10^{18}$  см [1, 6, 7].

2. Впервые комплексно рассмотрен вопрос об источниках первичного выделения энергии

в АЯГ с использованием кинематических и динамических характеристик ДСЧД. Предложена новая концепция первичного энерговыделения, которая базируется на преобразовании кинетической энергии движения компаньонов ДСЧД в ударные волны, распространяющиеся в аккрецирующей газовой среде. Для источника 3С 454.3 впервые получены параметры среды в границах орбиты движения компаньона: температура, плотность, объемная светимость. В рассмотренной модели предполагается наличие всенаправленного излучения, выходящего из среды с магнитным полем. Энергия, передаваемая в направленные джеты, может составлять всего несколько процентов от общей энергии, выделенной компаньоном за счет потери его орбитального момента [5, 8, 11].

3. На основе длительного мониторинга АЯГ на одиночных антеннах и методом РСДБ, проведен анализ соответствия возникновения мощных вспышек интегрального излучения с эпохами рождения ярких РСДБ-компонентов, которые появляются на изображениях РСДБ через несколько месяцев после вспышки. Анализ эволюции потоков и структуры 32 компактных внегалактических радиоисточников позволил выделить вспышки, связанные с возникновением первичного возмущения в ядре. В большинстве объектов следует ожидать появления новых компонентов в ядрах, выявить которые можно с помощью РСДБ-наблюдений. Для АЯГ 3С120, ОJ287, 1308+326, VL Lac получены новые данные сопоставления моментов рождения компонентов РСДБ со вспышками, зарегистрированными по данным многочастотного мониторинга на одиночных радиотелескопах [12].

4. Для АЯГ 0133+476, 1633+382, 2134+004, 2145+067 и 2251+158 получены новые синхронные данные в оптическом и радиодиапазонах, выполнен их анализ. Выявлены достоверные изменения быстрой переменности плотности потоков источников. Отсутствие заметной корреляции изменений плотности потока в различных диапазонах длин волн может указывать на то, что мы наблюдаем явление переменности после того, как сформируются условия острой направленности излучения в коллимированном

пучке выброса из полярной области системы «центральная черная дыра — внутренние области аккреционного диска» [3].

**Тестовые наземные РСДБ-сеансы.** Проведена модернизация аппаратуры и отработаны современные методы наблюдений необходимые для работы РТ-22 в глобальной РСДБ-сети. Радиотелескоп оснащен аппаратурой, необходимой для РСДБ-исследований космических объектов в миллиметровой области спектра: специализированными высокоскоростными устройствами регистрации данных «Марк-5А», «Марк-5В+», терминалом регистрации в режиме квазиреального времени, водородным стандартом частоты и времени со стабильностью  $10^{-15}$ . Эти нововведения дали возможность продолжить исследования сверхтонкой структуры источников космического радиоизлучения в диапазоне от миллиметровых до метровых длин волн, проводить наблюдения астероидов, планет земной группы и мониторинг космического мусора с помощью объединения методов РСДБ и классической радиолокации.

В плане отработки наземно-космической миссии «РадиоАстрон» были подготовлены и проведены наземные РСДБ-эксперименты в модах проекта: использовались верхние и нижние боковые полосы приема в правой и левой круговых поляризациях. Наблюдения проводились на двух идентичных радиотелескопах РТ-22 в Пушино (Россия) и в Симеизе (Украина).

Первый РСДБ-сеанс наблюдений был выполнен в октябре 2009 г. на длине волны 6 см. Регистрация данных производилась в полосах 4 МГц, в Симеизе на дисковые регистраторы системы «Марк 5А», а в Пушино — на РДР-1 (формат S2). Синхронизация систем в двух пунктах обеспечивалась водородными стандартами и системой времени GPS. Для наблюдений были выбраны два источника 3С 454.3 и S 0528+134 (Nimfa). Первый, более сильный источник, использовался для уточнения фазовых движений и офсетных параметров в каждом пункте наблюдений. Второй, более слабый объект, планировался для отработки времени когерентного усреднения.

В повторном РСДБ-сеансе на 6 см, который был проведен в июне 2010 г. с модернизированной

ной аппаратурой в Пушино, удалось реализовать планируемое время когерентного накопления (300 с по проектному заданию программы «РадиоАстрон»). Наблюдались источники ЗС 273 и 1055+018. На последнем, слабом источнике, проводилась отработка максимального времени когерентного усреднения данных интерферометрических наблюдений.

Минимальная длина волны наблюдений, планируемая в проекте «РадиоАстрон» — 1.35 см. В этой связи в мае 2010 г. был проведен сеанс интерферометрии между указанными радиотелескопами на длине волны 1.35 см в непрерывном спектре и в линиях  $H_2O$  вблизи частоты 22 ГГц.

Во всех экспериментах были получены и прокалиброваны амплитуды и фазы кросскорреляционных функций и их ход со временем. Проведенные РСДБ-сеансы показали работоспособность аппаратурных средств радиотелескопа РТ-22 (Симеиз) и его готовность к участию в дальнейших интерферометрических сеансах. После проведения модернизации РТ-70 (Евпатория) РСДБ-наблюдения будут продолжены с участием этой антенны по программе «РадиоАстрон».

1. *Вольвач А. Е.* Двойные системы из сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Кинематика и физика небес. тел. — 2009. — **25**, № 5. — С. 385—401.
2. *Вольвач А. Е.* Каталог источников для полетной программы «РадиоАстрон» // Космічна наука і технологія. — 2009. — **15**, № 6. — С. 28—43.
3. *Вольвач А. Е., Бычкова В. С., Кардашев Н. С. и др.* Быстрые изменения блеска блазаров в радио- и оптическом диапазонах // Астрон. журн. — 2009. — **86**, № 5. — С. 440—448.
4. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г.* Исследование источников каталога WMAP // Астрон. журн. — 2008. — **85**, № 6. — С. 483—497.
5. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М., Ларионов М. Г.* Характеристики среды вблизи сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Кинематика и физика небес. тел. Приложение. — 2009. № 6. — С. 93—97.
6. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М. и др.* Субпарсекковая структура двойных сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Астрон. журн. — 2010. — **87**, № 1. — С. 33—42.

7. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др.* Переменность излучения блазара ЗС 454.3 за период 40 лет // Астрон. журн. — 2007. — **84**, № 6. — С. 503—513.
8. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др.* Корреляция развития вспыхивающего явления в блазаре ЗС454.3 в радио- и оптическом диапазонах // Астрон. журн. — 2008. — **85**, № 9. — С. 1—9.
9. *Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г.* Об исследовании компактных радиоисточников для программы «РадиоАстрон» // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга. — 2004. — **75**. — С. 184—185.
10. *Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. и др.* Исследование статистических и спектральных характеристик радиоисточников каталога «РадиоАстрон» в мм диапазоне длин волн // Кинематика и физика небес. тел. — 2007. — **23**, № 3. — С. 174—185.
11. *Вольвач А. Е., Пушкарев А. Б., Вольвач Л. Н. и др.* Структуры, переменность и вспыхивающая активность четырех объектов типа VL Lac // Кинематика и физика небес. тел. Приложение. — 2009. — № 6. — С. 85—92.
12. *Вольвач А. Е., Пушкарев А. Б., Вольвач Л. Н. и др.* Эволюция потоков и парсекковой структуры компактных внегалактических радиоисточников по результатам мониторинга на частотах 4.8—36.8 ГГц и картографирования по геодезическим РСДБ-наблюдениям // Космічна наука і технологія. — 2009. — **15**, № 4. — С. 33—57.

Надійшла до редакції 17.12.10

*A.E.Volvach, N.S. Kardashev, M.G. Larionov*

#### THE RT-22 OF THE CRAO: SCIENTIFIC PROGRAM ELABORATION AND PERFORMANCE OF GROUND-BASED VLBI TEST EXPERIMENTS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE PROJECT «RADIOASTRON»

The Earth-space science program «RadioAstron» includes high-resolution (microseconds of arc) study of the morphology and dynamics of the circumnuclear regions of sources of powerful energy. In accordance with the scientific cooperation between Ukraine and Russia, the study is carried out using the 22-m radio telescope RT-22 of the SRI «Crimean Astrophysical Observatory». The research program provides the investigation with highly sensitive radiometers at frequencies of 22 GHz and 36 GHz. This makes it possible to obtain spectral characteristics of the sources near a frequency of 22 GHz, which is the fundamental frequency of the experiment «RadioAstron». To realize the project, the scientific program is developed, a substantial part of which is the study of compact structures in extragalactic sources, and ground-based VLBI test experiments are conducted.

УДК 537.591

П. И. Голубничий, Д. В. Решетняк, А. Д. Филоненко, А. Н. Хорошун

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ

## О ПРИРОДЕ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ РАДИОПОТОКА ОТ ЛУНЫ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

*Показано, що падіння масивних ( $< 10^4$  кг) метеорних тіл на поверхню Місяця не може бути безпосередньою причиною короткоперіодичних варіацій радіопотоку. Оцінка інтенсивності радіоemisії, що супроводжує руйнування крихких матеріалів, на вісім порядків нижча за значення, зареєстровані радіотелескопами на частотах 2 ГГц.*

### ВВЕДЕНИЕ

Короткопериодические вариации радиопотока от Луны [15, 18, 19] связываются с явлением радиоэмиссии, сопровождающей трещинообразование хрупких пород [16]. Элементарные оценки показывают, что для трещины с характерным размером 0.1–0.01 мм характерен спектральный максимум в диапазоне метровых волн. Это значит, что поверхность Луны может быть источником электромагнитных импульсов, которые будут затруднять идентификацию полезных сигналов в различных экспериментальных приложениях. Прежде всего здесь имеется в виду возможность использования поверхности Луны как мишени в радиоастрономическом методе измерения потоков частиц сверхвысокой энергии, а также возможность детектирования космических частиц с помощью лунного орбитального модуля [3–5]. В настоящей работе поставлена задача оценить спектральную интенсивность излучения, вызванного ударом метеорного тела о поверхность Луны, и сравнить ее с данными эксперимента. Это поможет выяснить, действительно ли наблюдаемые колебания радиопотока от Луны являются следствием падения метеорных тел (МТ) или за эти эффекты ответственны неизвестные нам явления. Кроме этого, можно будет оценить интенсивности возможных ра-

диопомех, наводимых на измерительные приборы при радиомониторинге лунной поверхности.

### ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ РАСТУЩЕЙ ТРЕЩИНЫ

Для оценки радиоэмиссии, вызванной ударом МТ, будем считать, что на определенной стадии ударного кратерообразования происходит хрупкое разрушение самого МТ и лунных горных пород. В породе должны образовываться трещины, которые стартуют и останавливаются на границах ее зерен, расщепляя их на две части. Такая модельная трещина показана на рис. 1. Обычно полагают, что ширина трещины совпадает с размером  $L$  зерна горной породы, а ее длина и величина раскрытия определяются как  $a = \int_0^t u_{cx}(t') dt'$ ,  $h \approx 2a(t) \operatorname{tg} \varphi$  ( $u_{cx}$ ,  $\varphi$  — скорость роста и угол раскрытия трещины). Скорость роста трещины изменяется при ее раскрытии и часто представляется в виде  $u_{cx} = u_{co} \sin(\pi t / \tau_c)$ , если  $0 \leq t \leq \tau_c$ ; и  $u_{cx} = 0$ , если  $0 > t > \tau_c$ , где  $u_{co}$  — максимальная скорость роста трещины;  $\tau_c = \pi L / 2u_{co}$  — характерное время элементарного скачка трещины. При хрупком разрушении горных пород наиболее эффективная генерация электромагнитных импульсов имеет место при раздвижении разноименно заряженных берегов трещин [7] (т. е. при изменении дипольных моментов). Электризация берегов может быть обусловлена, например, разрывами межатомных и межионных связей, сопровождающих рост трещин, которые и приводят к образованию на стенках флуктуационных зарядов [7].

Спектральная плотность излучения  $I(\mathbf{r}, \omega)$  равна  $I(\mathbf{r}, \omega) = dW / d\omega d\Omega = |\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|^2 r^2 \varepsilon_0 c / \pi$ . Скорость раздвижения берегов (и зарядов на них) равна  $u_{cy} \ll c$ . Приближённое значение электрического дипольного момента:  $|d(t)| \approx (\sigma_0 L^3 / 2) \times [1 - \cos(\pi t / \tau_c)]^2 \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\sigma_0$  — средняя поверхностная плотность зарядов на берегах трещины,  $ds'$  — элемент поверхности и  $\mathbf{r}'$  — радиус-вектор этого элемента. Спектральная напряженность поля для волновой зоны  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = (\mu_0 e^{ikr} / 4\pi r) \times [(\ddot{\mathbf{d}}_\omega \times \mathbf{n}) \times \mathbf{n}]$ , где  $\ddot{\mathbf{d}}_\omega$  — фурье-компонент второй производной по времени от дипольного момента. С учетом (1) спектральная плотность излучения для одной трещины равна  $I_1(\omega) = (\mu_0 / 16\pi^3 c) \times |\ddot{\mathbf{d}}_\omega|^2 \sin^2 \theta$ , где  $\theta$  — угол между вектором дипольного момента и направлением на точку наблюдения. После подстановки  $|\ddot{\mathbf{d}}_\omega|$  в спектральную плотность  $I_1(\omega)$  получим

$$I_1(\nu) = \frac{\mu_0}{\pi^5 c} \sigma_0^2 L^2 u_{co}^4 \nu^2 \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \varphi \times \left\{ \frac{\cos^2(\pi^2 Lv / (2u_{co}))}{\left[ \nu^2 - (u_{co} / (\pi L))^2 \right]^2} + \frac{\sin^2(\pi^2 Lv / (2u_{co}))}{\left[ \nu^2 - (2u_{co} / (\pi L))^2 \right]^2} \right\}.$$

Для оценки поля излучения будем использовать характерные значения параметров  $\sigma_0 = 1$  мКл/м<sup>2</sup>,  $\varphi = 5^\circ$  [14]. Предельная скорость роста трещин обычно отождествляется со скоростью распространения рэлеевских волн, поэтому для неё далее использовано значение  $u_{co} \approx 3$  км/с [12, 13]. Известно, что минералы материковых лунных пород (анортозиты) состоят в основном из зерен плагиоклаза, размеры которых лежат в весьма широком диапазоне:  $L = 0.1 \dots 18$  мм, однако преобладают кристаллы размером 4...5 мм [2].

### ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ

Относительные скорости столкновения МТ с поверхностью Луны лежат в пределах  $U_m = 10 \dots 70$  км/с. При высокоскоростном ударе размер зоны разрушения вдоль свободной поверхности приблизительно совпадает с границей ударного кратера радиуса  $r_k$ , а вглубь разрушение распространяется на расстояние  $h_d = 2r_k (1 + 0.2 \sqrt{\rho_m / \rho_r}) \sim 2r_k$  [12]; здесь  $\rho_m, \rho_r$  — плотности МТ и горной породы. Радиус  $r_k$  приближённо равен [6]

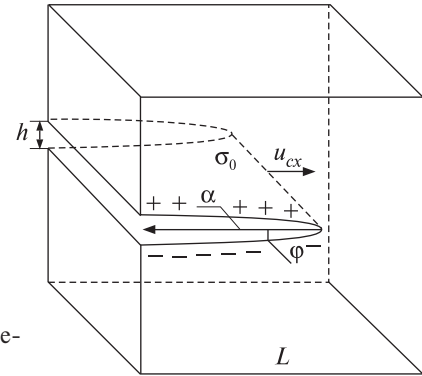


Рис. 1. Модель трещины (см. текст)

$$r_k = (6.65 \cdot 10^{-3} W_m^{0.294} + 0.755 D_m \sqrt{\rho_m / \rho_r}) (g_M / g_E)^{-0.165},$$

где  $W_m, D_m$  — кинетическая энергия и диаметр МТ;  $g_M, g_E$  — ускорение свободного падения на Луне и Земле соответственно. Так как  $\tau_c \ll \tau_d$ , и трещины ориентированы произвольно, то радиоизлучение из области трещинообразования для высоких частот ( $\sim 2$  ГГц) будет практически изотропным и некогерентным. Пусть предельно возможная концентрация трещин  $n_c$  такова, что  $n_c \sim 1/L^3$ , где  $L$  — характерный размер зерен горной породы. На частотах порядка 2—3 ГГц характерная длина поглощения  $\chi$  лунных пород составляет  $\chi = 4 \dots 6$  м [1]. Тогда спектральную плотность излучения от всей совокупности трещин на один стерадиан и на единицу частоты можно записать как  $I(\nu) = I_1(\nu) \chi V_d / (L^3 2r_k)$ , где  $V_d \approx 2\pi r_k^3$  — объем области разрушения и  $\chi / 2r_k$  — доля объёма, из которого выйдет излучение для диапазона 2—3 ГГц. Мощность на нагрузке антенны радиотелескопа  $P_A(\nu)$  для единичной полосы частот равна  $P_A(\nu) = I_1(\nu) \chi V_d A_{эф} / (2L^3 R_{ME}^2 \tau_k r_k)$ , где  $\tau_k = r_k / v_s$  — время распространения волн разрушения,  $A_{эф} \approx 10^3$  м<sup>2</sup> — эффективная площадь антенны,  $R_{ME} = 0.4 \cdot 10^9$  м — расстояние до Земли и  $v_s \approx 10$  км/с — скорость ударной волны. Оценку вариации температуры  $T_b$  найдём из равенства  $T_b(\nu) = P_A(\nu) / k$ , где  $k = 1.4 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана. Окончательно имеем

$$T_b(\nu) = \left( \frac{\mu_0 \sigma_0^2 u_{co}^4 \nu^2}{\pi^4 c L R_{ME}^2 k} \chi v_s A_{эф} r_k \right) \times \frac{\sin^2 \theta \cos^2(\pi^2 Lv / (2u_{co}))}{\operatorname{tg}^2 \varphi \left[ \nu^2 - (u_{co} / (\pi L))^2 \right]^2} + \frac{\sin^2(\pi^2 Lv / (2u_{co}))}{\left[ \nu^2 - (2u_{co} / (\pi L))^2 \right]^2}.$$

### СРАВНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

Оценим интенсивность радиоизлучения, вызванного ударом каменного ( $\rho_m = 3500 \text{ кг/м}^3$ ) МТ массой  $M_m = 10^4 \text{ кг}$  с анортозитом ( $\rho_r = 2940 \text{ кг/м}^3$ ) с относительной скоростью  $U_m = 70 \text{ км/с}$ . Радиус кратера  $r_k \approx 80 \text{ м}$ . Характерная средняя скорость волны разрушения  $v_s \approx 10 \text{ км/с}$ . Наиболее неопределённой величиной является средний размер зёрен горной породы. Исходя из этого, на рис. 2 представлены зависимости яркостной температуры для четырёх значений характерных размеров  $L$  (0.001—1 мм). Максимальное значение температуры для частоты 2 ГГц равно  $T_m \approx 10^{-7} \text{ К}$  (см. рис. 2) соответствует размеру зерна  $L = 1 \text{ мкм}$ . Это почти на восемь порядков ниже, чем измеренное в работах [15].

Если предположить, что разрушение хрупких пород связано с естественной сейсмической активностью Луны, или допустить, что столкновение с большим МТ вызвало эту активность, то источником радиоэмиссии будет участок, площадь которого намного больше, чем размеры кратера  $r_k$ , образовавшегося после столкновения с МТ. Например, если эпицентр «лунотрясения» находится на глубине  $h \sim 100 \text{ км}$ , то можно ожидать, что размеры области излучения будут иметь такой же порядок. В этом случае интен-

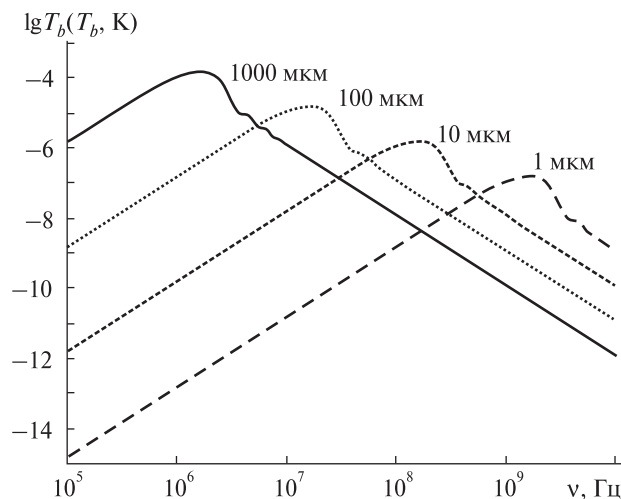


Рис. 2. Амплитудные значения вариаций яркостной температуры  $T_b$  для разных значений характерных размеров зёрен (числа у кривых)

сивность излучения увеличится приблизительно в  $h^2/r_k^2 = 10^6$  раз, и температура вариаций будет составлять 0.01 от экспериментального значения. Однако такие предположения нуждаются в дополнительных наблюдениях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальное значение вариаций яркостной температуры  $T_m \approx 10^{-7} \text{ К}$  для частоты 2—3 ГГц соответствует крайне экстремальным условиям (предельно высокая концентрация трещин, огромная масса МТ, максимальная скорость соударения). Поэтому столкновение МТ с поверхностью Луны вряд ли может быть непосредственной причиной короткопериодических вариаций радиопотока. В работах [10, 11, 17] показано, что максимум интенсивности радиоизлучения каскадного ливня в лунном реголите приходится на область радиочастот  $\sim 600 \text{ МГц}$ . Однако имеется ряд оснований считать, что более эффективными для работы детектора будут частоты, почти на порядок меньшие. Это связано с особенностями пространственного распределения радиоизлучения вблизи границы вакуум — лунный реголит [10, 11, 17]. На основании измерений, выполненных в диапазоне 2—3 ГГц, нельзя сделать определённых оценок интенсивности в мегагерцовой области частот, поскольку природа короткопериодических вариаций остаётся неизвестной. Этот факт стимулирует радиоастрономические измерения вариаций радиопотока от Луны на более низких частотах вплоть до декаметровых длин волн. Более того, для понимания природы явления необходим корреляционный эксперимент с одновременным измерением на декаметровых и сантиметровых длинах волн.

1. Березняк А. Р., Дагкесаманский Р. Д., Железных И. М. и др. Ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий по радиоастрономическим наблюдениям // Астрон. журн. — 2005. — 82, № 2. — С. 149—156.
2. Богатиков О. А. Анортозиты. — М.: Наука, 1979. — 232 с.
3. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей супервысокой энергии с помощью искусственного спутника Луны // Космічна наука і технологія. — 1999. — 5. — С. 87—92.
4. Гусев Г. А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К. М. и др. Концепция лунного орбитального радиоволнового детек-

- тора для регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий // Докл. РАН. — 2006. — **406**. — С. 327—333.
5. Дагкесаманский Р. Д., Железных И. М. Радиоастрономический метод регистрации нейтрино и других элементарных частиц сверхвысоких энергий // Письма в журн. эксперим. и теор. физики. — 1989. — **50**, № 5. — С. 233—235.
  6. Мелюш Г. Образование ударных кратеров. — М.: Мир, Геологический процесс, 1994. — 336 с.
  7. Перельман М. Е., Хатиаишвили Н. Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // Докл. АН СССР. — 1981. — **256**. — С. 824—826.
  8. Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей по электромагнитной радиоэмиссии ливня и возможности этого метода в диапазоне сверхвысоких энергий // Успехи физ. наук. — 2002. — **172**, № 4. — С. 439—471.
  9. Филоненко А. Д. Энергетический спектр черенковского излучения и радиоастрономический метод измерения потока космических частиц сверхвысокой энергии // Письма в журн. эксперим. и теор. физики. — 2007. — **86**, вып. 5. — С. 339—343.
  10. Филоненко А. Д. Об интерпретации результатов экспериментальной проверки эффекта Аскарьяна // Письма в журн. эксперим. и теор. физики. — 2009. — **89**, вып. 8. — С. 445—448.
  11. Филоненко А. Д. Пространственное распределение радиоизлучения, вызванного каскадным ливнем в лунном реголите // ЖТФ. — 2009. — **79**, № 6. — С. 129—134.
  12. Финкель В. М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. — М.: Металлургия, 1970. — 376 с.
  13. Шишкин Н. И. Докл. междунар. конф. «VIII Забабахинские научные чтения». РФЯЦ — ВНИИТФ, Снежинск, 5—9 сентября 2005.
  14. Электромагнитные предвестники землетрясений: Сб. / Под ред. М. А. Садовского. — М.: Наука, 1982. — 89 с.
  15. Berezhnou A. A., Bervalds E., et al. Radio observations of the Moon during activity periods of the Leonid and Lyrid meteor streams // Baltic Astronomy. — 2002. — **11**. — P. 507—527.
  16. Grimalsky V., Berezhnou A., Kotsarenko A., et al. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2004, **4**, p. 793-798
  17. Sholten O., Bacelar J., et al. Optimal Radio Window for the Detection of Ultra-High-Energy Cosmic Rays and Neutrinos off the Moon. arXiv:astro-ph/0508580
  18. Volvach A. E., Berezhnou A. A., Foing B., et al. Radio observations of the Moon at 3,6 cm before and after SMART-1 impact // Lunar and Planetary Science. — 2007. — **38**. — P. 1015.
  19. Volvach A. E., Berezhnou A. A., Khavroshkin O. B., et al. Simultaneous observations of the Moon at 6.2cm using 22-m radio telescopes at Pushchino and Simeis during Leonid meteor shower in November 2001 // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2005. — **21**, N 1. — P. 60—65.

Надійшла до редакції 17.12.10

*P. I. Golubnichiy, D. V. Reshetnyak,  
A. D. Filonenko, A. N. Khoroshun*

#### ON THE NATURE OF SHORT-PERIOD VARIATIONS OF THE LUNAR RADIO EMISSION IN THE CENTIMETRIC WAVE RANGE

It is shown that the fall of massive ( $< 10^4$  kg) meteoroids on the lunar surface can not be the proximate cause of short-period variations of radio flux. Our estimate for the intensity of radio emission attending the fracture of brittle materials is less than the estimate measured with radio telescopes at frequencies of about 2 GHz by eight orders of magnitude.

УДК 535.243.2+681.7

**Ю. В. Беляев, Л. В. Катковский, Ю. А. Крот, С. В. Хвалей, А. Д. Хомицевич**

Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка  
Білоруського державного університету, Мінськ, Білорусь

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Описуються вимірювання і оптимізація поля зору спектрометричного модуля фотоспектральної системи, що використовується на борту міжнародної космічної станції в рамках космічного експерименту «Ураган». Розглянуто модифіковану оптичну схему із зменшенням полем зору модуля спектрорадіометра в сагітальній площині, а також результати відносної прив'язки цього поля до поля зору модуля реєстрації зображень.*

### ВВЕДЕНИЕ

В результате реализации космического эксперимента «Ураган» на Международной космической станции (МКС) в период работы экспедиций МКС 8—МКС 13 на Землю доставлены десятки тысяч цифровых фотоизображений поверхности Земли. Получен огромный объем информации, широко освещенный в научной печати [6, 7, 9]. В развитие приборного обеспечения этих работ по заказу РКК «Энергия» (Россия) в Институте прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета совместно с Институтом географии РАН разработана и изготовлена фотоспектральная система (ФСС) для установки на Российском сегменте МКС.

Для съемки Земли из космоса на многих спутниках широко используются ориентированные на конкретные задачи линейные сканеры. Например, с 1986 г. на спутниках серий SPOT, с 1990 г. на индийских IRS-1C и -1D, на японских OPS (на JERS-1) и ASTER (на Terra); на американских коммерческих спутниках высокого разрешения IKONOS, QuickBird и OrbView-3. Линейные сканеры — одна из основных оптических технологий получения изображений, используемых на непилотируемых платформах.

Другая технология — это вращающиеся оптико-механические сканеры, используемые, например, на американских спутниках Landsat/TM, NOAA/AVHRR и Terra/MODIS [10].

Наконец, еще одна технология получения изображений основана на системах покадровой съемки. ФСС является системой съемки изображений и спектров для пилотируемой космонавтики и управляется оператором со всеми вытекающими отсюда преимуществами.

В качестве аналогов ФСС можно привести такие известные системы:

- цифровая камера ADS 40, предлагаемая компанией LH Systems [<http://www.lh-systems.com/products/ads40.html>], — высокопроизводительный цифровой сенсор, способный получать панхроматические, а также многоспектральные изображения в диапазоне 0.42—0.9 мкм;
- многоспектральная цифровая камера компании «SensyTech» (AA497 AMDC) — покадровый прибор с приблизительно 2000 пикселей по каждой из осей. Получение спектральных изображений обеспечивается оптическими фильтрами, помещенными в съемной турели [<http://www.sensytech.com/Imaging/adc.html>];
- цифровая камера Vexcel UltraCam-D — радиометрическое разрешение 12 бит на пиксель с высокой скоростью получения изображений [<http://www.vexcel.com/products/ultracam.html>].



Однако не существует полных прототипов созданной системы ФСС, которая по своей информативности (с учетом разработанной методики совместной обработки спектров и изображений [4]) обладает свойствами видеоспектрометра. ФСС предназначена для регистрации спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн 350—1050 нм, пространственно «привязанных» к цветным изображениям высокого пространственного разрешения. ФСС конструктивно выполнена в виде компактного переносного моноблока, который включает в свой состав модуль спектрорадиометра (МС), модуль регистрации изображения (МРИ) и модуль электроники (МЭ) [1, 3].

Важным этапом при создании оптико-электронной аппаратуры является точное определение ее спектрально-энергетических и угловых характеристик.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА**

Важной характеристикой спектральной аппаратуры является поле зрения прибора. В плоскости, перпендикулярной к линии входной щели (меридиональной плоскости) полихроматора угол поля зрения определяется из двух параметров: фокусное расстояние входного объектива и ширина входной щели. Для измерения угла поля зрения в сагиттальной плоскости была изготовлена установка, позволяющая жестко закрепить прибор и измерять малые углы его поворота. В качестве источника излучения был использован монохроматический излучатель метрологического комплекса «Камелия-М». Излучение выходящее из выходной щели монохроматора коллимируется сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 1.5 м. В параллельный пучок излучения устанавливается исследуемый спектрорадиометр ФСС на поворотном устройстве со шкалой отсчёта угла поворота таким образом, чтобы изображение выходной щели монохроматора было перпендикулярно к входной щели полихроматора МС ФСС. Было проведено измерение угла поля зрения МС в сагиттальной плоскости, величина которого составила более  $2^\circ$  [2, 5].

#### **КОМПЕНСАЦИЯ АСТИГМАТИЗМА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ПОЛИХРОМАТОРА МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА**

Для первоначальных значений углов поля зрения полихроматора модуля спектрорадиометра линейные размеры спектрометрируемого участка земной поверхности с высоты орбиты 400 км составляют  $0.237 \times 13.96$  км. Возникла необходимость уменьшить угол поля зрения полихроматора модуля спектрорадиометра в сагиттальной плоскости.

Был проанализирован ряд оптических схем по уменьшению астигматического действия вогнутых сферических дифракционных решеток, однако предложенные методы приводят к существенному увеличению габаритов полихроматора МС.

Для решения проблемы был проанализирован ход световых лучей внутри полихроматора и природа появления астигматизма в полихроматорах с вогнутыми дифракционными решетками [8]. На основе данного анализа было найдено решение, которое не требовало кардинального изменения оптической схемы — установка цилиндрического вспомогательного зеркала после дифракционной решетки вместо плоского. Задача данного зеркала «подфокусировать» световые лучи в сагиттальной плоскости на светочувствительную поверхность приемника излучения.

Расчет радиуса кривизны вспомогательного цилиндрического зеркала в сходящемся пучке — достаточно трудоемкая задача. Для проведения данного расчета была использована среда моделирования оптических систем «Code V». Применение данного пакета позволило провести ряд численных экспериментов для нахождения наиболее оптимального решения.

Смоделирована ситуация плоского вспомогательного зеркала. Так как величина астигматизма зависит от угла дифракции, то компенсация астигматизма различна для различных длин волн рабочего спектрального диапазона. Было рассчитано, что для полной компенсации астигматизма для излучения длины волны 700 нм — центра рабочего спектрального диапазона, радиус кривизны цилиндрического зеркала

должен составлять 716 мм. К тому же следует заметить, что компенсация астигматизма приводит к увеличению интенсивности излучения в плоскости приемника, что приводит к возрастанию чувствительности модуля спектрорадиометра в данной спектральной зоне — зоне действия наибольшей компенсации астигматизма. Проанализировав относительную спектральную чувствительность приемника излучения и зарегистрированный отклик прибора на излучение диффузного излучателя метрологического комплекса, было предложено сместить наибольшую компенсацию астигматизма дифракционной решетки в ИК-область спектра — 900 нм. Это решение позволило увеличить спектральную чувствительность МС в ИК-области — области наименьшей чувствительности приемника излучения. Радиус кривизны вспомогательного цилиндрического зеркала составил 650 мм. При этом величина астигматического отрезка для излучения с длиной волны 350 нм (начало рабочего спектрального диапазона) составила 3.5 мм, что соответствует углу поля зрения в  $1^\circ$  в сагиттальной плоскости, что вписывается в требование технического задания.

После анализа результатов моделирования установка вспомогательного цилиндрического зеркала с радиусом кривизны 650 мм была признана оптимальным решением для задач, возложенных на научную аппаратуру (НА) ФСС. Было изготовлено три экземпляра вспомогательных цилиндрических зеркал для опытного и двух рабочих образцов НА ФСС. Изготовленные элементы были установлены на образцы МС ФСС.

После установки вспомогательного цилиндрического зеркала были проведены прямые измерения поля зрения МС в сагиттальной плоскости. Использование цилиндрического зеркала позволило уменьшить угол поля зрения МС в сагиттальной плоскости до менее чем  $1^\circ$ . Этот угол поля зрения соответствует линейным размерам на поверхности Земли в 6.98 км. Таким образом, углы поля зрения МС составляют  $0.034 \times 1.0^\circ$ . Тогда спектрометрируемый участок земной поверхности будет иметь линейные размеры  $0.237 \times 6.98$  км.

#### ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПРИВЯЗКА ПОЛЯ ЗРЕНИЯ МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА К ПОЛЮ ЗРЕНИЯ МОДУЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

При получении с помощью НА ФСС спектров излучения, отраженного от подстилающей поверхности, необходимо не только знать геометрические размеры поля зрения МС, но и точно выделять эту область на снимке [3].

Привязку поля зрения МС к кадру МРИ можно выполнить только по удаленному контрастному объекту, чтобы на точность привязки не повлиял параллакс. Имея удаленный контрастный объект, задача привязки сводится к определению границ поля зрения МС в поле зрения МРИ. Кроме того, было необходимо вывести поле зрения МС в центр поля зрения МРИ, так как для оператора для быстрого наведения на интересующий объект наиболее удобно будет работать с НА ФСС при условии, что поле зрения спектрорадиометра центрировано в поле зрения МРИ. Как и для определения угла поля зрения МС, в качестве источника излучения выступала выходная щель монохроматического излучателя, расположенная в фокусе коллиматорного зеркала. При этом диаметр коллиматорного зеркала достаточен для одновременного размещения в параллельном световом пучке объективов МС и МРИ. Таким образом, с помощью НА ФСС регистрируется бесконечно удаленное изображение выходной щели монохроматического излучателя. Поворотом всей системы были определены положения границ поля зрения МС в кадре МРИ. Затем с помощью юстировочных винтов поле зрения МС было выведено в центр кадра МРИ. Определение границ поля зрения МС сопровождалось появлением сигнала от приемника излучения МС при попадании в данное поле зрения выходной щели монохроматического излучателя [3].

На основе спектрально-угловых характеристик НА ФСС и возможностей специального программного обеспечения разработан ряд способов и методов съемок с помощью данной системы. НА ФСС предполагает два режима съемки: «одиночный кадр» и «трассовая съемка». В режиме «одиночный кадр» снимается одно изображение и три связанных с ним спектра с разных

частей (площадок) кадра при условии, что ось ФСС неподвижна относительно движущейся по орбите МКС. В режиме «трассовая съемка» снимается заданная последовательность изображений и три спектра на каждое изображение. С учетом движения МКС перекрытие соседних кадров составляет 10–30 % [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа по разработке и реализации способа устранения астигматического эффекта привела к существенному уменьшению поля зрения модуля спектро радиометра в сагиттальной плоскости до  $1.0^\circ$ , что показывает эффективность применения вспомогательного цилиндрического зеркала для устранения астигматических эффектов.

В результате юстировок оптических осей двух модулей определено и скорректировано относительное взаиморасположение центров полей зрения МС и МРИ.

Исходя из параметров и возможностей НА ФСС, разработаны режимы и способы съемок при проведении космических экспериментов по оптической диагностике различных подстилающих поверхностей.

1. *Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Домарацкий А. В. и др.* Фотоспектральная система для космического эксперимента «Ураган» // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 2. — С. 41–48.
2. *Беляев Б. И., Веллер В. В., Домарацкий А. В. и др.* Фотоспектральная система для исследования подстилающих поверхностей с борта МКС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Тез. докл. VII Всероссийской откр. конф., Москва, 16–20 ноября 2009 г. [Электронный ресурс]. — М.: ИКИ РАН РФ, 2009. — (<http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=1844>).
3. *Беляев Б. И., Домарацкий А. В., Крот Ю. А. и др.* Фотоспектральная система для Международной Космической Станции, задачи и методы съемок // Информационные технологии, электронные приборы и системы: Сб. тез. Междунар. научно-практ. конф.

- ITEDS'2010, Минск, 6–7 апреля 2010 г. — Минск, БГУ, 2010. — Т. 2. — С. 11–15.
4. *Беляев Б. И., Катковский Л. В., Хвалей С. В., Хомицевич А. Д.* Повышение информативности изображений растительных объектов с использованием спектральных данных // Журн. прикладной спектроскопии. — 2007. — **74**, № 5. — С. 670–676.
  5. *Беляев Б. И., Крот Ю. А., Нестерович Э. И. и др.* Фотоспектральная система дистанционного зондирования земли с борта МКС // Четвертый Белорусский космический конгресс: Матер. конгресса, Минск, 27–29 октября 2009 г. — Минск, 2009. — Т. 2 — С. 30–35.
  6. *Десинов Л. В., Беляев М. Ю., Шарипов С. Ш. и др.* Мониторинг природных катастроф с МКС в 2005 году // Сб. тез. Третьей всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14–17 ноября 2005 г. — (<http://smis.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=415>).
  7. *Десинов Л. В., Ведешин Л. Н.* Программа «Ураган» стремиться к интеграции с ГИС [Текст] // ArcReview. — 2003. — № 3 (26). — ([http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number\\_26/13\\_uragan.htm](http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number_26/13_uragan.htm)).
  8. *Лебедева В. В.* Техника оптической спектроскопии. — М.: Изд-во МГУ, 1986. — 352 с.
  9. *Побединская М.* «Ураган» предупредит об ураганах и других природных катастрофах // Новости космонавтики. — 2003. — № 2. — (<http://www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/241/35.shtml>).
  10. *Airborne Pushbroom Line Scanners: An Alternative to Digital Frame Cameras* // GEOinformatics. — 2005. — Januari/Februari. — P. 50–57. — (<http://www.geoinformatics.com>).

Надійшла до редакції 17.12.10

*Yu.V. Belyaev, L.V. Katkovsky, Yu.A. Krot,  
S.V. Khvalei, A.D. Khomitsevich*

## ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF PHOTOSPECTRAL SYSTEM ANGULAR CHARACTERISTICS

We describe the analysis and optimization of angular characteristics of the photospectral system which is in current use onboard the International Space Station within the framework of the space experiment «Uragan». The results of our investigation of the spectrometer field-of-view angular characteristics and of field-of-view angle reducing in sagittal plane are given. Our results for positioning of the spectrometer unit field of view relative to the image registration unit field of view are discussed.

УДК 62-91; 51-37; 519.688; 004.932.2

**В. Е. Набивач<sup>1</sup>, В. Н. Опанасенко<sup>2</sup>, О. В. Семенив<sup>1</sup>, В. А. Яценко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України  
та Національного космічного агентства України, Київ

<sup>2</sup> Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, Київ

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

*Описано алгоритм визначення орієнтації космічного апарату за допомогою зоряного датчика. Представлено систему рівнянь, що використовується в алгоритмі визначення орієнтації космічного апарату. Запропоновано алгоритм ідентифікації сегментів зоряного неба, що ґрунтується на використанні навігаційного каталогу та найбільш інформативних ознак. Обговорюються перспективи реалізації алгоритму на програмованій логіці.*

### ВВЕДЕНИЕ

Звездные датчики (ЗД) находят все большее применение для высокоточного определения ориентации космических аппаратов (КА) [11, 12, 16]. Современные системы ориентации и навигации с использованием ЗД позволяют проводить трехосную ориентацию КА на основе алгоритмов распознавания сегментов звездного неба (АРСЗН) [9–12, 14, 16, 17, 19, 23, 25]. На сегодняшний день в мире насчитывается более десяти производителей, которые выпускают около 40 моделей звездных датчиков различных типов и назначения. Например, в России разработкой и производством ЗД занимаются в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), ОКБ «Марс», НПО «Геофизика—Космос» и НПО «Лептон» [3]. Разработка ЗД активно ведется и на западных предприятиях [3]: SODERN (Франция), «Ball Aerospace» (США), «Galileo Avionica» (Италия), «Drapac Laboratory» (США), «Goodrich» (США), «Jena-Ortronik» (Германия), TERMA (международная корпорация) и др. (см. [http://www.sodern.com/site/FO/scripts/siteFO\\_contenu.php?mode=&noeu\\_id=56&lang=EN](http://www.sodern.com/site/FO/scripts/siteFO_contenu.php?mode=&noeu_id=56&lang=EN); <http://www.ballaerospace.com/page.jsp?page=104>).

Приборы серии «БОКЗ» (блок определения координат звезд, ИКИ РАН) достаточно удачно

эксплуатируются в Российской Федерации. Они предназначены для высокоточного определения в реальном времени параметров трехосной ориентации по изображениям сегментов звездного неба. Основными элементами приборов БОКЗ является цифровая телевизионная камера на ПЗС-матрице, мощный сигнальный процессор и источник вторичного электропитания. Прибор БОКЗ-М используется в качестве астрокорректора гироскопических датчиков угловых скоростей, работающих в реальном времени. Поэтому требования по точности к ЗД предъявляются все более жесткие. Так, для координатной привязки элемента съемочной системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого пространственного разрешения требуется точность определения ориентации порядка долей секунды дуги [1].

Прибор БОКЗ-М имеет точность углового позиционирования оси  $Z$  — 1.5 сд (секунд дуги) при измерении параметров вращения вокруг осей  $X$ ,  $Y$ . При измерении параметров вращения вокруг оси  $Z$  точность определения угла составляет 15 сд.

Для повышения точности определения ориентации в ИКИ РАН предлагается использовать синхронно работающие приборы. Были проведены серии экспериментов по совместной работе двух ЗД с минутным и трехсекундным интервалом выдачи данных. На основе этих экспериментов в отделе оптико-физических исследований ИКИ РАН [1] реализован алгоритм рав-

ноточного определения трехосной ориентации до 1.5 сд по каждой из координат.

В настоящее время НПО «Геофизика-Космос» ведет разработку нескольких типов современных ЗД для различных КА [6]. Прибор 329К определяет углы трехосной ориентации приборной системы координат, которая жестко связана с корпусом прибора, относительно геоцентрической системы координат. Разработка, начатая в 2003 г., в настоящее время находится в завершающей фазе наземной экспериментальной отработки. Целью разработки является создание промышленного образца современного российского звездного прибора с характеристиками на уровне мировых и гарантированным ресурсом эксплуатации не менее 100 000 ч.

При этом предусматривается создание:

- собственно образца, который соответствует определенным техническим требованиям и прошел цикл экспериментальной отработки;
- комплекта конструкторской и технологической документации, выпущенной согласно действующим нормативным документам;
- необходимого для производства набора технологического и испытательного оборудования.

Словосочетание «мировой уровень» предусматривает создание прибора, уровень характеристик которого соответствует зарубежным образцам, которые выпускаются, пользовались и пользуются спросом у потребителей после 2000 г. К таким приборам были отнесены ЗД фирмы Sodern SED-16 (год летной квалификации 2002) и его модификация SED-26 (год летной квалификации 2005).

По основным характеристикам прибор 329К соответствует характеристикам ЗД SED-16/26. Конструктивная и электрическая схемы приборов типовые. Техническими особенностями прибора 329К являются

- проведение с помощью специального оптического канала полетной калибровки измерительного тракта, что обеспечивает высокую точность измерений в связанной с корпусом системы координат;
- использование при программной обработке информации так называемого «метода окон», который позволяет повысить помехозащищенность прибора;

- паспортизация системы внутренних параметров ЗД и их учет во время полета.

Дальнейшей модификацией прибора 329К является прибор 345К.

Приборы SED-16/26 — это полностью автономные трехосные универсальные приборы для определения ориентации по изображениям звезд. Это ЗД, которые предназначены для управления ориентацией КА в космическом пространстве на низких, средних и геостационарных орбитах или в глубоком космосе.

Основные черты приборов SED-16/26:

- значительная унификация,
- высокая надежность в условиях космической среды, в частности под действием излучения,
- автоматическое получение ориентации по трем осям при инициализации прибора,
- автономный режим, который требует минимального управления со стороны системы управления пространственным положением АОС,
- предоставление с высокой (до 10 Гц) частотой данных о трехосной ориентации,
- интеграции компактного оборудования в единый блок,
- возможности работы с высокими скоростями вращения (до 10 град/с) и угловыми ускорениями (до 10 град/с<sup>2</sup>) при частоте выдачи данных 10 Гц.

Фирма «Sodern» предлагает различные, в зависимости от нужного угла защитного экрана, интерфейса вывода данных, и других требований, варианты ЗД SED-16/26. Оптическое и электрическое оборудование наземного обеспечения также доступно потребителям. Прибор SED-26 является ITAR-free версией ЗД SED-16 (international traffic in arms regulations), что упрощает его использование в любой миссии. SED-26 сочетает в себе преимущества уже проверенных в полете конструктивных решений с современными техническими средствами их реализации.

Сейчас в космическом приборостроении наблюдается тенденция к комплексированию функционально близких приборов. Уже упоминалось, что в ИКИ РАН создан звездный координатор, сочетающий ЗД ориентации и гироскоп. Эти два прибора удачно дополняют друг друга, увеличивая надежность выполнения целевого задания. В настоящее время в ИКИ РАН раз-

рабатывается интегрированный прибор, который сочетает ЗД ориентации, гироскоп средней точности и устройство спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS. Предполагается, что этот прибор будет полностью удовлетворять требованиям КА ДЗЗ по точности ориентации.

Научные исследования в области космической техники и практические разработки приборов проводятся с использованием современных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Технология ПЛИС позволяет реализовать в кристалле практически любой проект цифрового прибора [21].

Важное место в создании перспективных систем ориентации в космическом пространстве отводится разработке быстродействующих алгоритмов определения ориентации КА с использованием методов идентификации сегментов звездного неба. При этом учитывается возможность засветки оптической части ЗД.

#### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Функциональная структура ЗД (рисунок) состоит из следующих компонентов:

- блок визуализации звезд на основе ПЗС-матрицы (регистрации звезд, определения засветки, формирования окон одиночных звезд, построения изображения);
- блок навигационного каталога звезд с информативными признаками;
- блок выдачи направления на звезды относительно приборной системы координат (ПСК) (оценки информативных признаков, классификации, определения ориентации ПСК);
- блок определения ориентации ПСК относительно инерциальной системы координат (ИСК).

Предполагается, что алгоритм определения ориентации звездного датчика (АОЗД) выдает направление на звезды с некоторой статистической погрешностью, а навигационный каталог звезд — направления на звезды без погрешности относительно ИСК. Алгоритм АОЗД по измеренным направлениям на звезды и данным из каталога определяет ориентацию ПСК относительно ИСК. Предполагается, что АОЗД может быть реализован на основе ПЛИС.

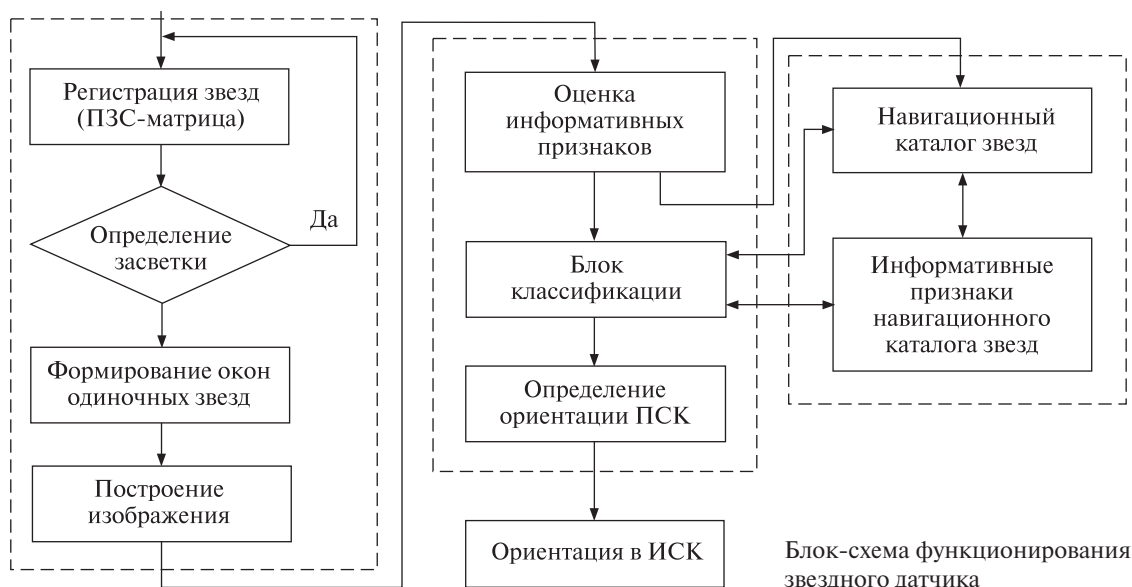
Алгоритм ориентации звездного датчика основывается на следующей модели. Вводим две правые системы координат  $Ox_1x_2x_3$  и  $Oy_1y_2y_3$ . Трехгранник  $x_1x_2x_3$  является ИСК, а  $y_1y_2y_3$  жестко связан с ЗД и является ПСК. Пусть в поле зрения ЗД находится  $N$  звезд,  $\mathbf{r}_i$  — единичный вектор, задающий точное направление на  $i$ -ю звезду, а  $\mathbf{q}_i$  — измеренный ЗД единичный вектор, направленный на ту же звезду.

Тогда решение задачи определения ориентации КА сводится к численному решению системы линейных уравнений

$$\mathbf{Z}\rho = \mathbf{b}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{Z} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} r_v^{(i)} r_v^{(i)}$ ,  $\mathbf{b} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} r_v^{(i)} \hat{q}_v^{(i)}$ ,  $\rho = 2v$ ,  $\mathbf{v} = (v_1 v_2 v_3)^T$  — параметры Родрига для кватерниона.

Данный алгоритм расчета ориентации предполагает использование по крайней мере двух различных звезд. Для рассчитанной ориентации можно определить вероятность попадания решения в нужную окрестность реальной ориентации. Если все звезды имеют одинаковую дисперсию погрешности измерения, то погрешность расчета ориентации распадается на две независимые друг от друга части: погрешность самого ЗД и константы, значение которой зависит от взаимного положения визируемых звезд. Из уравнения (1) следует, что если к звездам, с помощью которых ведется процесс ориентации, добавить группу хотя бы с одной парой звезд, то собственные числа матрицы  $-\mathbf{Z}$  увеличиваются. Это приводит к уменьшению следа матрицы  $-\mathbf{Z}$  и уменьшению погрешности ориентации. Поэтому увеличить точность ориентации можно не только за счет уменьшения погрешности ЗД, но и за счет увеличения числа звезд, используемых при расчете. При этом погрешность ориентации, рассчитанной по  $k$  кадрам при одних и тех же  $\mathbf{L}$  звезд, равна погрешности, рассчитанной по одному кадру тех же  $\mathbf{L}$  звезд при уменьшении дисперсии измерений в  $k$  раз. Проведен предварительный анализ шумовых факторов, влияющих на работу ЗД (световые помехи, естественные источники излучения, изменение яркости источника излучения).



### АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СЕГМЕНТА ЗВЕЗДНОГО НЕБА

В большинстве имеющихся алгоритмах распознавания сегмента звездного неба (АРСЗН) используются прямые методы поиска [7, 9, 10, 13–15, 17, 18, 22–26], в которых сравниваются наблюдаемые данные с каталогом звезд. Большинство этих алгоритмов не обладают достаточным быстродействием, что затрудняет их практическое использование.

Идентификация сегментов звездного неба требует высокого быстродействия реализации программных процедур, экономного использования оперативной памяти процессора и незначительного объема информации навигационного каталога. Для создания эффективного алгоритма необходимо использовать наиболее информативные признаки данных наблюдений [2], а для реализации АРСЗН целесообразно построить навигационный каталог на основе алгоритмов распознавания и выборки.

Для идентификации звезд использовался звездный каталог SKYMAP Master Star Catalog, созданный в NASA's Goddard Space Flight Center для поддержки приборов звездной ориентации и их программного обеспечения [20]. Главная версия каталога содержит информацию о звездных объектах (300000 звезд), которые имеют звездную величину более  $9^m$ .

Для построения модели классификации предложено использование метода опорных векторов [2]. Процесс построения АРСЗН состоит в последовательном выполнении процедур: создание навигационного каталога звезд, сегментация изображения; создание обучающей последовательности сегментов и их инвариантов, конвертация изображений звезд в матрицу чисел, оценивание опорных векторов и вычисление сферических координат ИСК звездного неба для каждого сегмента, тестирование и валидация алгоритма.

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАСВЕТКИ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Важную роль в первичной обработке данных ЗД занимает алгоритм определения засветки объектива звездного датчика (АОЗД) посторонними космическими объектами (планеты, астероиды, метеориты, Солнце и др.). Наличие засветки ухудшает работу АРСЗН и АОЗД.

Входные изображения можно описать на плоскости путем разбивки на элементы регулярной решетки и присвоения каждому элементу определенного атрибута.

Таким образом, изображение можно представить в виде матрицы  $C$ , компоненты которой  $C[l, j]$  характеризуют интенсивность яркости, где  $l$  — номер столбца,  $j$  — номер строки. Предположим, что каждая из звезд на изображении

отвечает определенному количеству элементов  $h_l$  в столбце и  $h_j$  — в строке матрицы  $C$ , которое зависит от звездной величины  $q$ . При этом несколько элементов  $C[l', j']$  могут принимать максимальное значение, где  $l' = 1, \dots, h_l^q$ ,  $j' = 1, \dots, h_j^q$ ,  $h_l^q < h_l$ ,  $h_j^q < h_j$ ,  $h_l^q$  — максимальное число элементов в столбце,  $h_j^q$  — максимальное количество элементов в строке. Далее определим максимальное число  $n$  элементов матрицы  $C$  путем подсчета числа  $h_l^q$  и  $h_j^q$  элементов  $C[l', j']$  для звезды с максимальным значением  $q$ . Тогда  $n$  будет равно

$$\begin{cases} n = h_l^q, & \text{если } h_l^q > h_j^q; \\ n = h_j^q, & \text{если } h_l^q \leq h_j^q. \end{cases}$$

Для реализации АОЗЗД предлагается использовать «аналитическое окно» размером  $W[n+1, n+1]$  с использованием бинарных деревьев.

#### АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Одним из методов цифровой обработки изображений, применяемых для устранения дефектов изображения, обусловленных помехами и шумами, является медианная фильтрация [4, 5, 8]. Медианные фильтры используются для сглаживания информации в случаях, когда шумовые характеристики неизвестны. Так, для двумерного окна, медианный фильтр из множества векторов, характеризующих яркость для полутонового изображения или цвет для цветового, выбирает вектор со средним значением, которое затем присваивается центральному пикселю окна.

Рассмотрим реализацию медианного фильтра в элементном базисе ПЛИС типа FPGA фирмы «Xilinx» [21], используя при этом последовательную, последовательно-параллельную и параллельную вычислительные модели. Пусть для входного множества двоичных векторов  $X = \{x_i\}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) необходимо определить медиану  $x_{\text{med}}$ . Алгоритм определения медианы в этом случае представляет собой сортировку данных с последующим выбором кода, имеющим номер  $(n-1)/2$  из отсортированной последовательности, нумерация которой начинается с нуля. Формируется квадратная матрица  $Y = \|y_{ij}\|$ , ( $i, j = 1, \dots, n$ ), где

$y_{ij} \in \{0, 1\}$  — элемент матрицы, который определяется по правилу:

$$\begin{cases} y_{ij} = 1, & \text{если } x_i \geq x_j, \forall j = i + z, z = 1, \dots, n - i; \\ y_{ij} = 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Элементы  $y_{ij}$  главной диагонали матрицы ( $i = j$ ) принимают нулевое значение. Необходимо определить значения элементов  $y_{ij}$  с индексами  $i > j$ , лежащих выше главной диагонали (количество этих элементов определяется величиной  $(n^2 - n)/2$ ). Значения элементов  $y_{ij}$ , лежащих ниже главной диагонали, будут принимать следующие значения:

$$\begin{cases} \text{если } (\forall i > j) y_{ij} = 1, & \text{то } y_{ji} = 0; \\ \text{если } (\forall i > j) y_{ij} = 0, & \text{то } y_{ji} = 1. \end{cases}$$

Для каждой строки полученной матрицы  $Y = \|y_{ij}\|$  вычисляется арифметическая сумма значений ее элементов  $s_i = \sum_j y_{ij}$ .

В зависимости от численного значения  $s_i$ , которое однозначно соответствует входному вектору  $x_i$ , получаем результат сортировки множества векторов  $X$ :

$$\begin{cases} \text{если } s_i = 0, & \text{то } x_i = \min\{X\}; \\ \text{если } s_i = (n-1), & \text{то } x_i = \max\{X\}; \\ \text{если } s_i = (n-1)/2, & \text{то } x_i = \text{med}\{X\}. \end{cases}$$

Предложенный алгоритм реализован различными способами в зависимости от количества одновременно формируемых элементов матрицы  $Y = \|y_{ij}\|$ . Результаты синтеза и реализации проектов в кристалле XCV50CS144-6 получены с использованием инструментальных средств FPGA Express и программ размещения и трассировки системы Xilinx Foundation Series.

#### ВЫВОДЫ

Проведен анализ состояния проблемы построения перспективных образцов 3Д ориентации. Последнее поколение 3Д автономной астроориентации на основе ПЗС-матриц входит в большинство современных систем ориентации и навигации космических средств. Дальнейшее развитие 3Д направлено на использование чувствительных сенсоров с активными пикселями, которые значительно более радиационно-стойкие, энергосберегающие, дешевые и компактные. Кроме того, значительное внимание уделяется комплексированию функционально близких приборов и интегрированию ис-



точников первичной информации (например гироскопа и ЗД, двух или трех ЗД, приборов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS).

Описан алгоритм определения ориентации ЗД с помощью звездного каталога. Предложен алгоритм идентификации сегмента звездного неба, основанный на навигационном каталоге и наиболее информативных признаках. На основе матричной вычислительной модели предложены алгоритмы и разработаны последовательная, параллельная и последовательно-параллельная структурные реализации фильтрации возможных шумов датчика с помощью операции сравнения на базе кристаллов ПЛИС.

1. *Аванесов Г. А., Красиков В. А., Никитин А. В.* Оценка точности прибора БОКЗ-М по результатам наземных и летных испытаний. Анализ синхронной работы двух приборов // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. — Таруса, 2008. — С. 44—45.
2. *Вапник В. Н., Червоненкис А. Я.* Теория распознавания образов. — М.: Наука, 1974. — 415 с.
3. *Дятлов С. А., Бессонов Р. В.* Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. — Таруса, 2008. — С. 11—31.
4. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. — М.: Мир, 1982. — Кн. 1. — 312 с.
5. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. — М.: Мир, 1982. — Кн. 2. — 792 с.
6. *Федосеев В. И., Герасимов С. А., Абакумов В. М., Исаков А. Н.* Новые звёздные приборы. // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. — Таруса, 2008. — С. 12—13.
7. *Accardo D., Rufino G.* Brightness independent star-up routine for star trackers // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2002. — **38**(3). — P. 813—823.
8. *Astola J., Haavisto P., Neuvo Y.* Vector median filters // Proc. IEEE. — 1990. — **78**, N 4. — P. 678 689.
9. *Bardwell G.* On-board artificial neural network multi-star identification system for 3-axis attitude determination // Acta Astron. — 1995. — **35**. — P. 753—761.
10. *Cole C. L., Crassidis J. L.* Fast star-pattern recognition using planar triangles // J. Guid. Control and Dynam. — 2006. — **29**. — P. 64—71.
11. *Eisenman R., Liebe C. C., Joergensen J. L.* The new generation of autonomous star trackers // Proc. SPIE. — 1997. — **3221**. — P. 524—535.
12. *Fossum E. R., Bartman R. K., Eisenman A. R.* Application of the active pixel sensor concept to guidance and navigation // Proc. SPIE. — 1993. — **1949**. — P. 256—265.
13. *Guangjun Z., Wei X., Jiang J.* Full-sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern // Image Vision Comput. — 2008. — **26**. — P. 891—897.
14. *Kolomenkin M., Pollak S., Shimshoni I., Lindenbaum M.* Geometric voting algorithm for star trackers // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2008. — **44**. — P. 441—456.
15. *Lee H., Bang H.* Star pattern identification technique by modified grid algorithm // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2007. — **43**. — P. 202—213.
16. *Liebe C. C.* Accuracy performance of star trackers—a tutorial // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2002. — **38**(2). — P. 587—599.
17. *Lin T., Zhou J. L.* All-sky automated quaternary star pattern recognition // J. Astronaut. — 2000. — 21. — P. 82—85.
18. *Mortari D.* Search-less algorithm for star pattern recognition // J. Astronaut. Sci. — 1997. — **45**(2). — P. 179—194.
19. *Mortari D., Samaan M. A., Bruccoleri C.* The pyramid star identification technique // Navigation. — 2004. — **51**. — P. 171—183.
20. *Myers J. R., Sande C. B., Miller A. C., et al.* SKY2000 Catalog, Version 4 (Myers+2002) // SAO/NASA ADS Astronomy. <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?source=V/109>
21. *Palagin A. V., Opanasenko V. N., Sakharin V. G.* Features of digital devices design of modern PLD of the Xilinx incorporation // J. Automation and Inform. Sci. — 2001. — **33**, N 3. — P. 80—89.
22. *Padgett C., Kreutz-Delgado K., Udomkesmalee S.* Evaluation of star identification techniques // J. Guid. Control and Dynam. — 1997. — **20**(2). — P. 259—267.
23. *Rousseau G. L. A., Bostel J., Mazari B.* Star recognition algorithm for APS star tracker: Oriented triangles // IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag. — 2005. — **20**. — P. 27—31.
24. *Samaan M. A., Mortari D., Junkins J. L.* Nondimensional star identification for uncalibrated star cameras // J. Astronaut. Sci. — 2006. — **54**. — P. 95—111.
25. *Wang Z. L., Quan W.* An all-sky autonomous star map identification algorithm // IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag. — 2004. — **19**. — P. 10—14.
26. *Zhang G. J., Wei X. G., Jiang J.* Star map identification based on a modified triangle algorithm // ACTA Aeronaut. ET Astronaut. SINICA 2006. — **27**. — P. 1150—1154.

Надійшла до редакції 17.12.10

*V. E. Nabivach, V. N. Opanasenko,  
O. V. Semeniv, V. O. Yatsenko*

#### AN ALGORITHM OF DETERMINATION FOR SPACECRAFT ORIENTATION WITH THE USE OF A STAR SENSOR

An algorithm for the spacecraft orientation determination using a star sensor is described. The equation system which is used in the spacecraft orientation algorithm is proposed. We describe an algorithm for star recognition which is based on the application of the navigation catalogue and on the most informative characteristics. Some prospects for the PLD-based algorithm realization are discussed.

**АНТОНОВ Олександр Васильович** — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрямок науки — радіоастрономія.

**БЄЛЯЄВ Юрій Володимирович** — завідувач лабораторії оптико-фізичних вимірювань відділу аерокосмічних досліджень Інституту прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка Білоруського державного університету (Мінськ), кандидат технічних наук.

Напрямок науки — метрологічне забезпечення оптоелектронних систем.

**БЛЮМ Олег Борисович** — завідувач лабораторії Національного ботанічного саду ім. М. М. Гришка Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — екологія, біоіндикація.

**ВЕЛЕСЬ Олександр Анатолійович** — заступник директора з наукової роботи, старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери Землі, моделювання спектрів атмосфери, аналіз молекулярних спектрів, комп'ютерна обробка спостережень, високопродуктивні паралельні обчислення на кластерах, GRID- і GPGPU-обчислення.

**ВОЛЬВАЧ Олександр Євгенович** — заступник директора з наукової роботи НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, почесний працівник космічної галузі України, лауреат премії НАН України ім. Є. П. Федорова.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, радіоастрономія, РНДБ.

**ГЕРАСИМОВ Юрій Михайлович** — головний інженер відділу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрямок науки — радіоастрономія.

**ГОЛУБНИЧИЙ Петро Іванович** — завідувач кафедри фізики Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, доктор фізико-математичних наук, професор, член Американського і Європейського фізичних товариств, дійсний член Інженерної академії України та Міжнародної академії інформатизації.

Напрямок науки — ядерна фізика і космофізика, фізика високих густин енергії.

**ЖУК Ігор Теодорович** — старший науковий співробітник лабораторії астрофізики Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрофізика.

**ЗЄЛИК Ярема Ігорович** — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — теорія та процеси управління, системний аналіз, оброблення сигналів, сонячно-земна фізика.

**КАРДАШЕВ Микола Семенович** — керівник Астрокосмічного центру Установи Російської академії наук Фізичного інституту ім. П. М. Лебедева, академік РАН.

Напрямок науки — радіоастрономія, РНДБ.

**КАТКОВСЬКИЙ Леонід Володимирович** — головний науковий співробітник, професор.

Напрямок науки — теорія переносу випромінювання, методи дистанційної спектروفотометрії та планування експериментів.

**КИФОРЕНКО Світлана Іванівна** — провідний науковий співробітник Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій і систем Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, доктор біологічних наук.

Напрямок науки — біокібернетика, токсикологія, токсикометрія, регулювання біохімічних процесів.

**КОЛОС Людмила Миколаївна** — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — системний аналіз, обробка даних дистанційного зондування Землі.

**КРИВОДУБСЬКИЙ Валерій Никифорович** — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геліофізика, сонячна активність та сонячна магнітогідродинаміка.

**КРОТ Юрій Олександрович** — молодший науковий співробітник відділу аерокосмічних досліджень Інституту прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка Білоруського державного університету (Мінськ), магістр фізико-математичних наук.

Напрямок науки — проектування оптоелектронних систем.

**КУЗНЕЦОВ Володимир Дмитрович** — директор Установи Російської академії наук «Інститут земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова РАН», доктор фізико-математичних наук, дійсний член Міжнародної академії астронавтики, лауреат Премії Уряду Російської Федерації.

Напрямок науки — космічна і сонячна фізика.

**КУССУЛЬ Наталія Миколаївна** — завідувач відділу космічних інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор.

Напрямок науки — інтелектуальні обчислення, методи обробки супутникових даних, розподілені системи, Grid-технології, Sensor Web, дистанційне зондування Землі.

**ЛАРІОНОВ Микола Григорович** — заступник керівника Астрокосмічного центру Установи Російської академії наук Фізичного інституту ім. П. М. Лебедева, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрофізика, радіоастрономія.

**ЛЕОНТЬЄВ Антон Юрійович** — провідний інженер лабораторії супутникових досліджень ближнього космосу Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, аспірант.

Напрямок науки — фізика іоносфери.

**ЛІЗУНОВ Георгій В'ячеславович** — завідувач лабораторії супутникових досліджень ближнього космосу Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — фізика іоносфери.

**ЛОГІНОВ Олексій Олексійович** — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геліофізика, геофізика, математичне моделювання.

**МАСЛОВА Наталія Василівна** — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, сонячно-земна фізика.

**МИКУЛЬСЬКА Ірина Олександрівна** — старший науковий співробітник Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій і систем Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — біокібернетика, токсикологія, токсикометрія.

**МІРОШНИЧЕНКО Леонтій Іванович** — завідувач Сектору геліоекологічних зв'язків відділу фізики сонячно-земних зв'язків Установи Російської академії наук «Інститут земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова РАН», доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика сонячно-земних зв'язків (сонячні спалахи, прискорення частинок, сонячні космічні промені, радіаційна небезпека і геофізичні ефекти СКП).

**НАБІВАЧ Володимир Євгенович** — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — системний аналіз, ідентифікація, математичне моделювання, оптимізація, космічне приладобудування.

**ОПАНАСЕНКО Володимир Миколайович** — провідний науковий співробітник Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — реконфігуровні обчислювальні системи, проектування цифрових пристроїв, проблемно-орієнтовані системи, математичне моделювання.

**ПАРНОВСЬКИЙ Олексій Сергійович** — завідувач лабораторії астрофізики Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — сонячно-земна фізика, астрофізика, фізична кібернетика.

**ПОЛОНСЬКА Анна Юріївна** — студентка Національного авіаційного університету.

Напрямок науки — прикладна фізика, космічна погода.

**РЕШЕТНЯК Денис Вадимович** — старший науковий співробітник кафедри фізики Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

Напрямок науки — кінетика перехідних процесів у нелінійних середовищах.

**РОГОВЕЦЬ Анна Володимирівна** — науковий співробітник відділу аерокосмічних досліджень Інституту прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка Білоруського державного університету (Мінськ).

Напрямок науки — обробка відеоспектральних даних систем ДЗЗ.

**РУЖИН Юрій Яковлевич** — заступник директора Установи Російської академії наук «Інститут земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова РАН», завідувач лабораторії активних експериментів у космосі, професор, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії Росії.

Напрямок науки — фізика плазми навколоземного космічного простору.

**САЛЬНИКОВ Микола Миколайович** — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — сонячно-земні зв'язки, геліофізика, математичне моделювання.

**СЕМЕНІВ Олег Володимирович** — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — ідентифікація, системний аналіз, оптимізація, дистанційне зондування.

**СИНЕЛЬНИКОВ В'ячеслав Михайлович** — завідувач лабораторії фізики приземної плазми Установи Російської академії наук «Інститут земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова РАН», доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика плазми навколоземного космічного простору.

**СКАКУН Сергій Васильович** — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — інтелектуальні методи обробки даних, дистанційне зондування Землі, Sensor Web.

**СУМАРУК Юрій Петрович** — співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України.

Напрямок науки — геомагнетизм.

**ФЕДОРОВ Олег Павлович** — директор, завідувач відділу наук про мікрогравітацію Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — космічне матеріалознавство, космічна політика.

**ФІЛОНЕНКО Анатолій Дмитрович** — професор кафедри фізики Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика високих густин енергії.

**ХВАЛЄЙ Сергій Володимирович** — старший науковий співробітник відділу аерокосмічних досліджень Інституту прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка Білоруського державного університету (Мінськ), кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка оптоелектронних систем і планування експериментів.

**ХОМИЦЕВИЧ Андрій Доріанович** — молодший науковий співробітник відділу аерокосмічних досліджень Інституту прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка Білоруського державного університету (Мінськ).

Напрямок науки — проектування оптоелектронних систем.

**ХОРОШУН Ганна Миколаївна** — доцент кафедри фізики Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

Напрямок науки — хвильові процеси, сингулярна оптика.

**ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович** — головний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу.

**ШАВРІНА Ангеліна Василівна** — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика зоряних атмосфер, моделювання молекулярних спектрів зірок пізніх спектральних класів і земної атмосфери.

**ШЕВЧЕНКО Володимир Миколайович** — старший науковий співробітник відділу керування динамічними системами Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — теорія керування, фізична кібернетика.

**ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович** — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — інтелектуальні обчислення, моделювання та розробка розподілених систем, Grid-технології, Sensor Web.

**ШЕМІНОВА Валентина Андріївна** — провідний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфер Сонця і зірок, діагностика процесів у атмосфері, моделювання фотосферних шарів Сонця.

**ЯЦЕНКО Віталій Олексійович** — завідувач відділу Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — білінійні динамічні системи, оптимізація, синергетика, інтелектуальні сенсори, дистанційне зондування, космічне приладобудування.