НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ + ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ Том 21 4(95) + 2015

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

3MICT

Космічне приладобудування

Демьяненко П. А., Зиньковский Ю. Ф. Волоконно-оптические датчики с импульсной модуляцией оптического потока

Відьмаченко А. П., Іванов Ю. С., Синявський І. І. Розробка поляризатора зображувального поляриметра на основі поляризаційних плівок

Кириленко А. А., Перов А. О., Скресанов В. Н., Стешенко С. А., Гламаздин В. В., Натаров М. П., Шубный А. И. Многочастотный облучатель зеркальной антенны для криогенных приемных фокальных блоков радиотелескопов VLBI2010-сети нового поколения: синтез, проектирование, эксперимент

Лобанов Л. М., Волков В. С. Створення та дослідження конструкцій перетворюваного об'єму космічного призначення

Космічне матеріалознавство

Стрижало В. О., Скрипник Ю. Д. Експериментальні засоби дослідження циклічної втоми конструкційних матеріалів космічного призначення

Космічна астрономія

Бойко Р. С., Даневич Ф. А., Зуєва О. В., Кобичев В. В., Кобичева Л. М., Кобичев Р. В., Кропив'янський Б. М., Мокіна В. М., Пода Д. В., Поліщук О. Г., Тимошенко А. І., Третяк В. І., Черняк Д. М. Дослідження властивостей нейтрино і пошуки ефектів за рамками стандартної моделі частинок

CONTENTS

Space Instrument Design

- 3 *Demianenko P. O., Zinkovski Yu. F.* Fiber-optic sensors with a pulse-modulated optical flow
- **19** *Vidmachenko A. P., Ivanov Yu. S., Syniavskyi I. I.* The development of the imaging polarimeter's polarizer on the basis of the polarizing film
- 24 Kirilenko A. A., Perov A. O., Skresanov V. N., Steshenko S. A., Glamazdin V. V., Natarov M. P., Shubny A. I. Multifrequency feed of reflector antenna for the radiotelescope cryogenic receiver focal block for the new generation VLBI2010-network: synthesis, design, experiment
- **32** *Lobanov L. M., Volkov V. S.* Development and investigation of transformable-volume structures for space applications

Space Material Science

39 *Strizhalo V. O., Skrypnyk Yu. D.* Experimental setup for the investigation of cyclic fatigue of structural materials for space applications

Space Astronomy

44 Boiko R. S., Danevich F. A., Zueva O. V., Kobychev V. V., Kobycheva L. M., Kobychev R. V., Kropivyansky B. N., Mokina V. M., Poda D. V., Polischuk O. G., Tymoshenko A. I., Tretyak V. I., Chernyak D. M. Properties of neutrino and search for effects beyond the standard model Бубнов І. М., Вольвач Я. С., Доровський В. В., Коваль А. О., Милостна К. Ю. Скоординовані синхронні спостереження об'єктів сонячної системи методами наземнокосмічної низькочастотної радіоастрономії

Космічна геодинаміка та геоінформатика

Хода О. А. Определение координат восточноевропейс- 56 ких перманентных ГНСС-станций по данным наблюдений для GPS-недель 1632—1708

Фізика навколоземного космічного простору

Козак Л. В., Костик Р. І., Черемних О. К., Прохорен- 66 ков А. С. Прояви процесів самоорганізації плазми в атмосфері Сонця та навколоземному просторі

Дистанційне зондування Землі

Лялько В. І., Попов М. О., Яценко В. О., Сахацький О. І., Станкевич С. А., Зслик Я. І., Козлова А. О., Мовчан Д. М., Жолобак Г. М., Набівач В. І., Семенів О. В., Підгородецька Л. В., Апостолов О. А., Дугін С. С., Пєстова І. О., Семко І. Д., Ваколюк М. В., Краснопір О. В. Розробка методів дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів у межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України

Космічна біологія та медицина

Бриков В. О. Біоенергетика рослинних клітин в умовах **84** Brykov V. O. Bioenergetics of plant cells in microgravity мікрогравітації

Лобачевська О. В., Хоркавців Я. Д., Кияк Н. Я., Кіт Н. А., Данилків І. С. Гравіморфогенез гаметофіту мохів

хін О. Ю., Піскова М. В., Пастухов А. О., Борисов А. А., Крисанова Н. В., Борисова Т. О. Оцінка біомодуляторних властивостей та нейротоксичності аналогу місячного ґрунту

Наші автори

Станіславський О. О., Коноваленко О. О., Захаренко В. В., 51 Stanislavsky А. А., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Bubnov I. N., Volvach Ya. S., Dorovskyy V. V., Koval A. A., Mylostna K. Yu. Coordinated synchronous observations of solar system objects using the ground- and space-based methods of low-frequency radio astronomy

Space Geodynamics and Geoinformatics

Khoda O. A. Estimation of coordinates of the Eastern European permanent GNSS stations using observation data for GPS weeks 1632–1708

Physics of the Near-Earth Space

Kozak L. V., Kostyk R. I., Cheremnykh O. K., Prokhorenkov A. S. Signs of self-organization processes in the solar atmosphere and near Earth space

Remote Sensing of the Earth

Lvalko V. I., Popov M. O., Yatsenko V. O., Sakhatsky O. I., 81 Stankevich S. A., Zelyk Ya. I., Kozlova A. O., Movchan D. M., Zholobak G. M., Nabivach V. I., Semeniv O. V., Pidgorodetska L. V., Apostolov O. A., Dugin S. S., Pestova I. O., Semko I. D., Vakoluk M. V., Krasnopir O. V. Remote estimation techniques of biophysical parameters of forest plant communities and agrophytocenoses within different landscape and climatic zones of Ukraine

Space Biology and Medicine

- 94 Lobachevska O. V., Khorkavtsiv Ya. D., Kyyak N. Ya., Kit N. A., Danylkiv I. S. Gravimorphogenesis gametophytes of mosses
- Назарова А. Г., Позднякова Н. Г., Воронова О. О., Чуні- 103 Nazarova A. G., Pozdnyakova N. G., Voronova O. O., Chunihin O. Yu., Piskova M. V., Pastuhov A. O., Borysov A. A., Krisanova N. V., Borisova T. O. Analysis of biomodulatory properties and neurotoxicity of lunar dust analogue

112 Our authors

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних та технічних наук

У підготовці видання взяло участь Українське регіональне відділення Міжнародної академії астронавтики

Відповідальний секретар редакції: О.В. КЛИМЕНКО

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54, тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua

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

Підписано до друку 18.09.15. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс. Ум. друк. арк. 12,18. Обл.-вид. арк. 12,79. Тираж 95 прим. Зам. № 4334.

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 681.586.5, 531.768.

П. А. Демьяненко, Ю. Ф. Зиньковский

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Исследуется проблема метрологически низких возможностей измерителей на основе аналоговых волоконно-оптических датчиков (ВОД), анализируются ее причины и обосновывается переход к импульсным (дискретным) принципам модуляции параметров оптического потока в ВОД. Для этого в оптический поток вводятся дополнительные, неоптические, параметры, на которые перекладывается роль реципиентов информации, и с которых эта информация может быть воспроизведена с необходимой точностью. Разработана оптическая схема и конструкция ВОД с импульсной модуляцией интенсивности оптического потока (ИВОД), проведены метрологические расчеты параметров измерителя линейных ускорений, построенного на основе ИВОД.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики ускорения, импульсная модуляция, волоконно-оптические акселерометры.

введение

Благодаря удачному сочетанию в волоконных световодах (ВС) ряда уникальных технических и эксплуатационных параметров волоконная оптика (ВО) стремительно вошла в современную технику связи (в первую очередь дальнюю) и очень скоро обрела там господствующее положение. Главными составляющими такого успеха ВО выступили два фактора.

Во-первых — малое затухание оптического сигнала при его распространении по ВС. В наше время уже достигнут теоретический предел затухания для ВС типа «кварц — кварц» ($\alpha = 0.18 \text{ дБ/км}$), что позволяет реализовать безретрансляционные участки ВО-трактов длиной до 340 км [23], а это более чем в 200 раз превышает расстояние между ретрансляторами в системах электрической связи с коаксиальными кабелями [22]. В перспективе использование халькогенидных и фторидных материалов как возможной основы для производства ВС сулит настолько низкие затухания сигнала ($\alpha \sim 10^{-3} \, \text{дБ/км}$), что станет возможной прокладка безретрансляторных ВО-трактов в глобальных масштабах. Пока, однако, не найдено удовлетворительного решения технологических проблем — формирования ВС из кристаллических материалов. Добавим, что возможности увеличения длин безрепитерных участков линий связи на базе обычных (кварцевых) ВС также еще до конца не исчерпаны. Использование солитонного режима передачи импульсов по обычных кварцевых ВС позволило существенно (до 1000 км) увеличить длины безретрансляторных участков волоконно-оптических систем связи (ВОСС) [19].

Во-вторых — ВО-линии обеспечивают настолько широкую полосу частот каналируемых ими сигналов, которая принципиально недостижима в электрических линиях связи. Так, сегодня уже достигнута скорость передачи информации по ВО-линиях 1 Пбит/с (1 Пбит/с =

[©] П. А. ДЕМЬЯНЕНКО, Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, 2015

= 10¹⁵ бит/с), а по прогнозам российского академика Е. М. Дианова в ближайшее 10-летие будут разработаны ВО-системы связи, скорость передачи данных в которых составит от 10 до 100 Пбит/с [http://www.km.ru/science-tech/2013/ 06/05/nauka-i-tekhnologii/712498-akademik-dianov-mir-nakhoditsya-na-poroge-peta-er].

При этом, чтобы у читателя не сложилось ошибочного мнения, будто бы ВО была призвана обеспечить потребности исключительно техники дальней связи, напомним, что впервые задача создания ВО-тракта была сформулирована и практически реализована разработчиками истребителя "Harrier" (военно-воздушные силы Великой Британии, конец 1960-х гг.) для обеспечения на его борту надежной и качественной связи.

И решающим доводом в пользу применения оптического тракта передачи информационных сигналов в этом случае стала его принципиальная невосприимчивость электромагнитных (ЭМ) помех любой интенсивности и любого происходжения. Это обстоятельство становится определяющим и при эксплуатации датчиков на современных энергонасыщенных объектах, а также в тех случаях, когда датчики необходимо розмещать на значительных удалениях (сотни метров, километры) от пунктов сбора и обработки информации.

Именно эта особенность трактов каналирования оптических сигналов привлекает к себе внимание разработчиков датчиков (измерительных преобразователей). Развитие автоматизации и роботизации современных производственных процессов, вплоть до создания безлюдных технологий и замкнутих самоуправляемых производств, требует применения большого количества разнообразных датчиков. Именно благодаря использованию датчиков, непрерывно контролирующих параметры производственных процессов, обеспечивается должное функционирование этих предприятий и производств. В конечном итоге именно качеством датчиков обеспечивается необходимое качество выходной продукции. Большие надежды при этом возлагаются именно на волоконно-оптические датчики (ВОД).

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ КАК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: ОЖИДАНИЯ И РЕАЛИИ

Дадим общую характеристику ВОД. Под этой аббревиатурой обычно понимают и собственно ВОД, чувствительные элементы (ЧЭ) которых выполнены непосредственно на основе ВС, и просто оптические датчики, соединяемые с ВС, по которым к ним подводится немодулированный оптический поток и отводится модулированный.

Как и электрические, ВОД могут быть активными и пассивными. Первые под воздействием на них измеряемой величины $F(\chi)$ сами генерируют световое излучение, которое затем по ВС направляется к фотоприемнику (ФП), преобразующему оптический сигнал $I(\chi)$ в электрический $U(\chi)$ (рис. 1).

Информативным параметром оптического сигнала активных ВОД является его интенсивность, которая однозначно определяется величиной энергетического фактора $F(\chi)$, действующего на ВОД.

На основе активных ВОД могут быть построены измерители высоких температур, интенсивностей ультрафиолетового, рентгеновского, гамма- и других излучений, энергия которых достаточна для превращения ее тем или иным способом в энергию оптического излучения.

Значительно шире представлены пассивные волоконно-оптические датчики (рис. 2). В них действующая на ВОД измеряемая физическая величина лишь модулирует параметры оптического потока, проходящего через ВОД. Генерируется же этот поток внешними по отношению к ВОД источниками света (ИС), что позволяет формировать потоки излучения с требуемыми параметрами.

Поток проходящего через ВОД оптического излучения может быть охарактеризован с помощью четырех параметров, каждый из которых может быть промодулирован независимо от других. Это, в частности, интенсивность оптического потока, частота осцилляций световых волн, их фаза и пространственная ориентация их плоскости поляризации. Соответственно с этим различают и четыре типа ВОД: амплитудные, частотные, фазовые и поляризационные. В простейших, аналоговых, ВОД измеряемая величина непрерывно модулирует какой-либо из перечисленных параметров светового потока, адекватным образом (аналогово) отображаясь в нем.

Отметим общее важное требование ко всем типам ВОД: непосредственно перед подачей оптического потока на ФП модуляция любого параметра этого потока должна быть адекватным образом (без потерь информации об измеряемой величине) преобразована в модуляцию интенсивности. Обусловлено это требование в конечном итоге тем, что дальнейшая обработка сигналов ВОД осуществляется методами и средствами электронной техники, а это значит, что оптические сигналы *а priori* должны быть преобразованы в электрические.

Такое преобразование выполняют ФП, в основе работы которых лежит явление фотоэффекта. При этом необходимо отметить, что все без исключения ФП в принципе не в состоянии отслеживать мгновенные изменения параметров световой волны. Это можно было бы объяснить, например, тем, что частота осцилляций световой волны слишком высока (~10¹⁵ Гц), а участвующие в явлении фотоэффекта элементарные носители информации (на входе ФП — фотоны, а на его выходе — электроны) существенно различаются своей инерционностью. Однако дело даже не в этом, а в том, что световой ЭМ-волны, которую принято описывать уравнениями Максвелла, как таковой не существует, а световой поток на самом деле является потоком фотонов. При этом фотоны представляют собой осциллирующие (с частотами ~10¹⁵ Гц и с несогласованными в общем случае фазами) сгустки ЭМ-энергии, каждый из которых в отдельности способен проявлять присущие ему волновые свойства [10]. Очевидно, задача напрямую отобразить волновые параметры потока фотонов с помощью потока электронов является нереальной. По этой причине при прямом детектировании оптического сигнала (потока) с помощью ФП информация о модуляции его волновых параметров (фазы, частоты, поляризации) будет просто безвозвратно утеряна.



Рис. 1. Схема включения активного волоконно-оптического датчика (ВОД): ВС — волоконный световод, ФП — фотоприемник



Рис. 2. Схема включения пассивного ВОД: ИС — источник света, ДОЭ — дополнительные оптические элементы, ВС — волоконный световод, ФП — фотоприемник

Вместе с тем, поскольку модуляция параметров протекающего через ВОД оптического потока, осуществляется воздействующими на него физическими величинами естественного происхождения, то и быстрота изменений оптических параметров потока при такой их модуляции будет определяться скоростью изменения параметров этих измеряемых (модулирующих) физических величин. Понятно, что временные изменения промодулированных таким образом параметров оптического потока будут уже не столь быстротечны, как изменения собственно волновых параметров оптического потока, поэтому они, в принципе, без проблем могут быть адекватно отображены в выходном сигнале ФП.

Однако в силу квантово-энергетической природы фотоэффекта $\Phi\Pi$ в принципе способен воспринимать и преобразовывать в электрический вид только один параметр оптического потока — его интенсивность, которая является его интегральным энергетическим параметром, усредненным как по большому отрезку времени t (t >> T, где T — период колебаний световой волны), так и по большому числу фотонов. Образно говоря, $\Phi\Pi$ способен адекватно преобразовывать только плотность входного потока фотонов (интенсивность оптического потока) в плотность выходного потока электронов (в силу электрического тока — фототока).



Рис. 3. Схема измерительного тракта на основе волоконно-оптического датчика: ИС — источник света, ДОЭ дополнительные оптические элементы, ВС — волоконный световод, ФП — фотоприемник

Из этого следует, что для извлечения информации, заложенной в модуляцию волновых параметров оптического потока, эту модуляцию следует адекватным образом преобразовывать в модуляцию интенсивности. Только после такого преобразования становится возможным прямое детектирование оптического сигнала с помощью ФП, которое будет осуществляться без потерь информации, заложенной в модуляции волновых параметров сигналов.

Именно необходимостью преобразований модуляции объясяется наличие дополнительных оптических элементов (ДОЭ) в оптических схемах всех ВОД (кроме, конечно, амплитудных, которые изначально модулируют интенсивность оптического потока) (рис. 2). Это, например, элементы опорных плеч в интерферометрических схемах частотных и фазовых ВОД или же поляризаторы и анализаторы в схемах поляризационных ВОД.

Волоконно-оптические датчики давно пользуются повышенным вниманием разработчиков. А первоначальные успехи их применения в 1980-х гг. и стремительный рост объемов капиталовложений в их развитие, даже позволили некоторым авторам сделать тогда оптимистические прогнозы о замене в ближайшие 10—20 лет вообще всех традиционных (електрических) датчиков на ВОД. Основания для такого оптимизма были. Приведем пример с советской ракетой-носителем «Энергия» (1980-е гг.): замена в бортовой системе управления полетом ракеты электрических датчиков и трактов каналирования их сигналов на ВО, позволила уменьшить стартовый вес ракеты на 20 тонн.

Однако уже тогда высказывались и более взвешенные суждения относительно оптимис-

тических ожиданий широкого внедрения ВОД. Основное внимание авторы этих работ уделяли в первую очередь метрологическим возможностям измерительных устройств, использующих ВОД как измерительные преобразователи.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛОГОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

При оценке метрологических возможностей ВОД их нельзя рассматривать обособленно, поскольку их возможности как измерительных преобразователей могут быть реализованы только в составе реальных измерительных устройств. При этом, помимо безусловных достоинств ВО, на метрологических параметрах ВОД отразятся также и параметры других связанных с ними элементов измерительного тракта вместе с присущими им достоинствами и недостатками. В первую очередь это касается ИС и ФП, которые, собственно, и обеспечивают работоспособность ВОД (рис. 3). Оценка предельных точностных возможностей аналоговых ВОД проводилась нами в составе измерительных ВО-систем [3].

На рис. 3 условно показаны: ИС — источник света для возбуждения ВС — например, полупроводниковый лазер типа ИЛПН-206 (Р₀ = = 10^{-3} Вт, λ = 1.3 мкм), P_o — мощность оптического потока, подводимого к ВОД, λ — длина световой волны, ВС — волоконно-оптический кабель, например, типа КВСП-50/125 с погонным затуханием $\alpha \le 3$ дБ/км, $F(\chi)$ — измеряемая физическая величина, действующая на ВОД, ФП полупроводниковый фотодиод, например, типа ЛФД-2 с лавинным умножением фототока (квантовая эффективность $\eta = 0.4$, коэффициент лавинного умножения M = 20, спектральная плотность напряжения шумов фототока на сопротивлении нагрузки фотодиода $R_{\mu} = 1$ кОм равна $(U_{\rm m})_{\Phi\Pi} = 3 \cdot 10^{-8} \,\mathrm{B} \cdot \Gamma \mathrm{H}^{-0.5}.$

Для упрощения анализа были приняты такие допущения:

 абсолютная стабильность (температурная, временная и пр.) всех параметров элементов измерительного тракта ВОД (ИС, ФП, ВС и пр.),

— полоса пропускания следующего за $\Phi\Pi$ электрического тракта $\Delta f = 1$ Гц. Пороговая чувствительность ВОД — это тот наименьший прирост действующей на него измеряемой физической величины, вызывающий такой прирост его выходного сигнала, который будет однозначно воспринятым на фоне шумов.

Основные составляющие шума на резисторе нагрузки ФП:

а) шумы, обусловленные токами утечки $\Phi Д$ (в первую очередь его темновым током), спектральная плотность напряжения этих шумов $(U_{\rm m})_{\Phi\Pi}$ приводится в паспорте на $\Phi Д$,

б) фотонные шумы оптического потока, которые обусловлены его дискретной структурой — флуктуациями плотности потока фотонов, спектральная плотность напряжения фотонных шумов $(U_{\mu})_{\phi or}$ на резисторе нагрузки R_{μ} :

$$(U_{\rm m})_{\rm por} = \sqrt{\frac{2e^2 P \eta}{hv} M^2 F(M)} \cdot R_{\rm H}, \qquad (1)$$

где $\sqrt{\frac{2e^2 P\eta}{hv}M^2 F(M)}$ — спектральная плотность

шумов фототока на выходе ФД; e — заряд электрона, Кл; P — мощность оптического потока на входе ФД, Вт; η — квантовая эффективность ФД; $h\nu$ — энергия кванта оптического потока, Дж; M^2 — средний квадрат коэффициента лавинного умножения, F(M) — фактор-шум неидеальности процессов лавинного умножения (для безлавинных ФД M и F(M) принимают равными единице),

в) дробовые шумы фототока I_{ϕ} (шумы Шоттки), которые являются следствием дискретной структуры электрического тока и обусловлены флуктуациями плотности потока электронов, спектральная плотность напряжения дробовых электронных шумов $(U_{\mu\nu})_{\mu\nu}$ на резисторе нагрузки R_{μ} :

$$(U_{\rm III})_{\rm ym} = R_{\rm H} \sqrt{2eI_{\rm p}} , \qquad (2)$$

где $I_{\phi} = \frac{eP\eta}{hv}$ — фототок, протекающий через резистор R_{μ} ,

г) *шум Найквиста* — тепловой шум самого резистора $R_{_{\rm H}}$; спектральная плотность напряжения равна

$$(U_{\scriptscriptstyle\rm III})_{\scriptscriptstyle RH} = \sqrt{4kTR_{\scriptscriptstyle\rm H}} , \qquad (3)$$

д) *шумы* ИС (U_ш)_{ИС}.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

Спектральные плотности перечисленных шумов в широком диапазоне частот постоянны, источники этих шумов некоррелированы между собой, а поэтому их суммарная спектральная плотность равна:

$$U_{\rm III} = \sqrt{(U_{\rm III})^2_{\Phi\Pi} + (U_{\rm III})^2_{\Phi\sigma\tau} + (U_{\rm III})^2_{3\pi} + (U_{\rm III})^2_{RH} + (U_{\rm III})^2_{HC}}.$$
 (4)

Запишем условие пороговой чувствительности ВОД, принимая отношение сигнал/шум в полосе частот $\Delta f = 1$ Гц равным единице:

$$\frac{\Delta P_{\text{nop}} e \eta}{h \nu} M R_{\text{H}} = U_{\text{III}} \cdot \Delta f, \qquad (5)$$

где $\Delta P_{\text{пор}}$ — наименьший прирост оптической мощности на входе $\Phi \Pi$, который, будучи преобразованным в прирост его выходного сигнала (фототока), однозначно будет воспринят на фоне шумов.

Модуляционную характеристику ВОД считаем линейной:

$$p = \frac{\chi}{\chi_0} \delta, \tag{6}$$

где p — коэффициент пропускания (прозрачность) модулятора ВОД, как функция некоторой обобщенной координаты χ (параметра ЧЭ ВОД), χ_0 — такое значение обобщенной координаты ЧЭ, при котором обеспечивается наибольшая прозрачность модулятора, δ — коэффициент внутренних потерь оптического излучения в ВОД.

С учетом (6) и потерь излучения в ВО-трактах (принимая, что $l_1 = l_2 = l$), выражение для прироста пороговой мощности на входе $\Phi\Pi$ приобретет вид

$$\Delta P_{\rm nop} = P_0 \frac{\Delta \chi_{\rm nop}}{\chi_0} \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l},\tag{7}$$

где P_0 — мощность оптического потока на входе ВОД, Вт; $\Delta \chi_{nop}$ — пороговое изменение обобщенной координаты ЧЭ, обусловливающее пороговый прирост оптической мощности на входе ФП; α — коэффициент погонного затухания мощности оптического потока при его распространении по ВС, Дб/км; *l* — расстояние между ВОД и пунктом сбора информации, км.

С учетом (7) выражение (1) примет вид

$$(U_{\rm III})_{\rm por} = R_{\rm H} \sqrt{\frac{e^2 P_0 \eta \delta \chi 10^{-0.2\alpha d}}{0.5 \chi_0 h \nu}} M^2 F(M) \,. \tag{8}$$

Учитывая (1)—(4) при подстановке (7) и (8) в (5) и выполняя необходимые преобразования, получим выражение для пороговой чувствительности ВОД:

$$\Delta \chi_{\text{пор}} = \frac{\chi_0 h v F(M)}{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}} \times \sqrt{\frac{4kTR_{\text{H}} + 2eIR_{\text{H}}^2 + (U_{\text{m}})_{\Phi\Pi}^2 + (U_{\text{m}})_{\text{AC}}^2}{e^2 R_{\text{H}}^2 M^2 F^2(M)}} + \frac{P_0 \eta \delta \chi \cdot 10^{-0.2\alpha l}}{0.5 \chi_0 h v \cdot F(M)}}, (9)$$

Из выражения (9) легко получить выражение для оценки предельно достижимой минимальной погрешности измерений при посредстве аналоговых ВОД. Для этого наибольшее изменение обобщенной координаты $\Delta \chi_{max}$, обусловливающее максимальное значение сигнала на выходе ВОД, примем равным $0.5\chi_0$, а наименьшее, соответственно, $\Delta \chi_{nop}$. Тогда предельно достижимая минимальная погрешность измерения может быть представлена в таком виде:

$$\chi_{nop} = \frac{2h\nu F(M)}{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}} \times \sqrt{\frac{4kTR_{\mu} + 2eIR_{\mu}^2 + (U_{\mu\nu})^2_{\Phi\Pi} + (U_{\mu\nu})^2_{\Pi\Pi}}{e^2 R_{\mu}^2 M^2 F^2(M)}} + \frac{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}}{h\nu \cdot F(M)}}.$$
(10)

Дадим оценку шумам, обусловленным спецификой процессов генерации света в полупроводниковом лазере. Уровень шумов оценивался по выражению

$$N = -10 \lg \frac{\langle P^2 \rangle}{\langle P_0 \rangle^2},$$

где $\langle P^2 \rangle$ — средние квадратичные флуктуации мощности излучения, а $\langle P_0 \rangle$ — постоянная составляющая мощности излучения. Значение шума было постоянным в диапазоне частот до 400 МГц и при номинальном уровне мощности составило 140 Дб [13]. Пересчет этих данных в напряжение шумов на резисторе нагрузки ФД дал величину того же порядка, что и напряжение фотонных шумов оптического потока. Это означает, что использование лазерного ИС существенно не ухудшает предельных параметров аналоговых ВОД.

Оценка численных значений слагаемых, входящих в выражения (9) и (10), показала, что

$$\frac{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}}{h v \cdot F(M)} \gg \frac{4k T R_{\mu} + 2e I R_{\mu}^2 + (U_{\mu})_{\Phi \Pi}^2 + (U_{\mu})_{AC}^2}{e^2 R_{\mu}^2 M^2 F^2(M)}.$$
(11)

Учитывая (11) и пренебрегая потерями в ВОтракте ($10^{-0.2\alpha l} \approx 1$), выражения (9) и (10) можно существенно упростить:

$$\Delta \chi_{\text{nop}} \approx \chi_0 \sqrt{\frac{h \nu F(M)}{P_0 \eta \delta}}, \ \chi_{\text{nop}} \approx 2 \sqrt{\frac{h \nu F(M)}{P_0 \eta \delta}}.$$
(12)

Подставляя численные значения величин в последнее из выражений (12), получим [3]: $\gamma_{\text{пор}} \approx \approx 10^{-6} \text{ Гц}^{-0.5}$.

Заметим, что эта оценка получена при условии выполнения ряда идеализированных допущений, которые на практике выполнить трудно, а потому реально достижимые значения γ_{\min} для измерителей на основе аналоговых ВОД еще хуже [1, 2, 11, 14].

Истолкуем полученный результат. Невысокие метрологические возможности аналоговых ВОД обусловлены метрологически низким качеством оптического потока, проходящего через ВОД. Это, с одной стороны, высокий уровень его собственных (фотонных) шумов, а с другой — относительно низкий общий уровень его интенсивности. Первая из указаных причин есть следствием дискретности оптического потока как потока высокоэнергетичных фотонов и в определенной степени является следствием другой причины — малого уровня оптической мощности, вводимой в ВС от современных ИС.

Работы по усовершенствованию элементной базы ВО ведутся и, конечно, будуть созданы ИС, способные обеспечить ввод в стандартные ВС существенно больших уровней мощности. Однако простое увеличение мощности в тракте ВОД не сможет радикальным образом решить проблему повышения точности измерений. Во-первых, вместе с ростом мощности оптического потока возрастает также и мощность фотонных (дробовых) шумов пропорционально корню квадратному потока, а поэтому 1000-кратное увеличение мощности сулит лишь 30-кратное уменьшение погрешности измерения. Во-вторых, введение в ВС значительных уровней мощности вызовет появление в них нелинейных эффектов, что нарушает сам принцип роботи аналоговых ВОД.

Таким образом, мы вынуждены констатировать невозможность построения измерительных устройств с аналоговыми ВОД, которые в вопросах точности измерений могли бы составить достойную конкуренцию традиционным (электрическим) измерительным устройствам.

Вместе с тем достоинства ВО как основы для построения ВОД не подлежат сомнениям и побуждают искать выход из создавшейся ситуации.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Поиск путей выхода из описанной ситуации привел нас к выводу о необходимости пересмотра как самих принципов формирования информативных сигналов в ВОД, так и принципов их дальнейшей (электрической) обработки [4, 5]. В результате мы пришли к осознанию необходимости отказа от аналоговых принципов измерения и перехода к неаналоговым (дискретным) принципам измерения. Реально это означает, что для повышения точности измерений с помощью ВОД необходимо в процессе модуляции ими оптического потока вводить в этот поток новые, дополнительные к оптическим, но неоптические, параметры, на которые и следует переложить роль реципиентов информации. Такой подход позволяет сберечь все достоинства ВО, поскольку носителем информации продолжает оставаться оптический поток. Однако при этом проблема точности измерений больше не будет связанной с принципиально низкоточными измерениями интенсивности маломощного оптического потока — она переносится из области оптических измерений в другие, неоптические области, где этой проблемы либо просто нет, либо она там решена надлежащим образом.

В общем случае неаналоговой модуляции оптического потока информация может налагаться либо на его пространственные параметры (координатная модуляция), либо на его временные параметры (импульсная модуляция).

В первом случае измерительная информация может кодироваться дискретно-пространственным (координатным) распределением параметров выходящего из ВОД оптического потока (как правило, его интенсивности).

Во втором случае информационным параметром импульсной последовательности может быть:

• число импульсов (измерение в таком случае сводится к подсчету числа импульсов, что, в принципе, можно выполнить безошибочно),

• частота поступления импульсов (измерение в этом случае сводится к подсчету числа импульсов, приходящихся на единицу времени, заметим, что измерение временных интервалов также можно выполнить с надлежащей точностью),

• временные интервалы между импульсами (измерение сводится к определению значений временных промежутков между импульсами, гарантом высокой точности измерений и в этом случае выступает возможность высокото́чных измерений временны́х интервалов) и т. п.

Сказанное предполагает либо создание специальных, неаналоговых ВОД, либо, что иногда возможно, использование обычных аналоговых ВОД в несвойственных им неаналоговых режимах работы. В последнем случае, когда измеряемая величина может изменяться в широких пределах, можно использовать свойство некоторых аналоговых ВОД циклично изменять свой выходной сигнал. Устройством обработки сигналов таких ВОД может быть просто счетчик числа циклов, безошибочность работы которого и гарантирует высокую точность измерений.

Примером практической реализации датчиков первого типа могут быть цифровые ВОД для измерения углов поворота на основе дисковых растровых оптических модуляторов. Точность измерений в этом случае определяется точностью изготовления кодирующих дисков (пластин). Очевидное преимущество таких ВОД простота получения результата измерений. Среди недостатков таких ВОД можно назвать:

• значительные габариты кодирующих дисков, которые тем больше, чем выше требования к точности измерений,

• малый круг физических величин, которые могут быть измерены такими ВОД (практически это только угловые и линейные перемещения и их производные).

Значительно бо́льшими функциональными возможностями обладают ВОД, выходной сигнал которых формируется в виде временной последовательности оптических импульсов. Обработку сигналов цифровых ВОД можно (и следует) вести методами и средствами цифровой техники, что практически исключает возможность привнесения ошибки обработки сигнала. Кроме того, использование компьютерной или микропроцессорной обработки позволяет целенаправленно корректировать результаты измерений. Благодаря этому можно нейтрализовать влияние на результат измерений как естественных недостатков и несовершенств ВОД, так и погрешностей их изготовления и юстировки. Это могут быть:

• нелинейности преобразовательных характеристик,

• взаимное влияние составляющих векторных измеряемых величин вдоль разных осей чувствительности,

• неперпендикулярность осей зеркал, задающих пространственную ориентацию осей чувствительности ВОД,

• несовпадение оптических и геометрических осей ВОД и т. п.

Другими словами, имея мощный аппарат обработки сигналов, основную тяжесть интеллектуальной нагрузки в процессе измерений можно переложить из собственно ВОД на устройства обработки их сигналов. Это позволяет снизить уровень требований к самим ВОД (к тщательности их изготовления, сборки, юстировки, условиям эксплуатации и т. п.), не снижая при этом общего высокого уровня требований к качеству измерений в целом.

Изложенные соображения открывают возможность разработки ВОД нового класса для создания на их основе прецизионных измерителей, которые могли бы составить достойную конкуренцию их электрическим аналогам. В частности, для решения ряда первоочередных задач геофизики и навигации необходимы акселерометры с пороговой чувствительностью от $10^{-12}g$ и меньше. Среди таких задач можно отметить:

• экспериментальная проверка стабильности положения центра масс Земли,

• измерение параметров траектории смещения полюсов Земли,

• измерение гравитационной постоянной,

• изучение неоднородностей гравитационного поля Земли и других космических объектов непосредственно с орбит их искусственных спутников с помощью малоразмерных градиентометров,

• создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем для контроля и управления движением автономных объектов (например подводных лодок, космических летательных аппаратов) и т. п.

Из описанных в литературе можно привести пример ВОД ускорения, модулирующего интенсивность оптического потока, пороговая чувствительность которого составляет 2·10⁻⁶g [20]. Для ВОД ускорения, модулирующего фазу оптического потока, экспериментальные значения порогового ускорения составили 10⁻⁷g [21].

Рекордная чувствительность $10^{-9}g$ получена в работе [17] при измерении ускорения свободного падения путем усреднения результатов измерений в интервале времени 100 с. Эти данные были реализованы благодаря использованию мобильного атомного гравиметра, размещавшегося в подземной исследовательской лаборатории с низким уровнем шумов на глубине 500 м. Пробной (чувствительной) массой гравиметра было облако охлажденных до температуры $2 \cdot 10^{-6}$ К атомов ⁸⁷Rb, которые под действием силы тяжести падали в вакууме в трехмерную магнитно-оптическую яму, создаваемую после адиабатического отключения лазерных лучей.

Заметим, что во всех приведенных примерах описаны лабораторные макеты измерителей, которым до реальных измерительных инструментов предстоит еще не простой путь.

Из доступных сегодня на ринке промышленных типов измерителей можно отметить, например, пьезоелектрические акселерометры фирмы ZETLAB, например типа AP 2050, пороговая чувствительность которого $2 \cdot 10^{-5}g$ [http://zetview. com/catalog/vibrodats/icp/sense.php].

СХЕМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Результатом проделанной работы стала разработка нового класса ВОД с импульсной модуляцией интенсивности проходящего через них оптического потока (ИВОД) [6, 15].

Принципиальная возможность реализации высокоточных измерений линейных ускорений посредством рассматриваемого ниже прецизионного акселерометра на основе разработанного ИВОД базируется на:

возможности практической реализации высокоточных измерений временных интервалов, задаваемых оптическими импульсами,

возможности создания высокодобротной кварцевой колебательной системы,

независимости метрологических параметров акселерометра от любых нестабильностей параметров оптических и электрических элементов измерительного тракта ИВОД.

Последний пункт объясняется тем, что измеряемыми (информационными) величинами в выходном сигнале ИВОД являются не энергетические параметры оптического потока (как это имеет место в случае аналоговых ВОД), а значения величин временных интервалов, которые оптическими импульсами только задаются.

Схематическое устройство ИВОД ускорения с ЧЭ-модулятором маятникового типа приведено на рис. 4 [6]. Упругий подвес конического маятника выполнен на основе кварцевой нити, которой является ВС 1, консольно закрепленный в корпусе ИВОД. На свободном конце консоли ВС 1 закреплена инерционная масса (ИМ) 2, выполненная из магнитомягкого материала.

В робочем режиме ИВОД маятник 2 совершает круговое вращательное движение, возбуждаемое и поддерживаемое незатухающим благодаря согласованному поочередному силовому действию на ИМ со стороны закрепленных в корпусе ИВОД электромагнитов 4. Оптическая схема ИВОД юстирована так, что при отсутствии боковых ускорений ось конического маятника совпадает с осью ОΖ. При этом конец ВС движется в плоскости, задаваемой пересечением взаимно перпендикулярных осей кривизны расположенных под ним цилиндрических зеркал 3. Оси этих зеркал (OY, OX и OZ) определяют соответствующие направления пространственных осей чувствительности ИВОД (ОУ, ОХ и ОΖ, рис. 4, а).



Рис. 4. Схематическое устройство ИВОД ускорения: 1 — волоконный световод, 2 — маятник, 3 — цилиндрические зеркала, 4 — электромагниты, 5 — распределительсумматор

Каждый раз в момент пересечения концом ВС оси кривизны какого-нибудь зеркала часть оптического потока, непрерывно истекающего из торца ВС, отражается этим зеркалом назад в ВС. Непрерывный оптический поток, входящий в ИВОД, и поток оптических импульсов, выходящий из него, разделяются с помощью Y-образного волоконно-оптического распределителясумматора 5.

Таким образом, выходной сигнал ИВОД представляет собой временную последовательность коротких оптических импульсов. Формально эту последовательность можно рассматривать как состоящую из двух «вложенных одна в другую» последовательностей (рис. 5), каждая из которых формируется «своим» цилиндрическим зеркалом [6].

При отсутствии боковых ускорений интервалы времена пребывания маятника по обе стороны каждой из осей зеркал будут одинаковыми (рис. 5, *a*). Это значит, что разность длительностей каких-либо двух соседних временны́х интервалов, задаваемых оптическими импульсами



Рис. 5. Выходной сигнал ИВОД: a -случай $a_x = a_y = a_z = 0$, $T = T_0$, $\Delta T_x = T_{x'} - T_{x''} = 0$, $\Delta T_y = T_{y'} - T_{y''} = 0$, $\Delta T_z = T - T_0 = 0$, $\delta -$ случай $a_x \neq a_y \neq a_z = 0$, $T = T_0$, $\Delta T_x \neq 0$, $\Delta T_y \neq 0$, $\Delta T_z = T - T_0 = 0$, e -случай $a_x \neq a_y \neq a_z \neq 0$, $T \neq T_0$, $\Delta T_x \neq 0$, $\Delta T_x \neq 0$, $\Delta T_z = T - T_0 = 0$, e -случай $a_x \neq a_y \neq a_z \neq 0$, $T \neq T_0$, $\Delta T_x \neq 0$, $\Delta T_y \neq 0$, $\Delta T_z = T - T_0 \neq 0$

в каждой из их последовательностей, будет равняться нулю.

При появлении бокового ускорения описываемая концом маятника окружность смещается от своего начального положения в направлении, противоположном направлению вектора ускорения. Величина этого смещения определится величиной ускорения, действующего на ИВОД, величиной его ИМ и жесткостью подвеса маятника. Вследствие этого интервалы времён пребывания маятника по разные стороны осей зеркал уже не будут однаковыми — один из каждой пары соседних временных промежутков, задаваемых оптическими импульсами в каждой из последовательностей, увеличит свою длительность, а другой — уменьшит (суммарная их длительность при этом, очевидно, не изменится) (рис. 5, δ). Чем большей (меньшей) будет величина бокового ускорения, тем большей (меньшей) будет и разность длительностей соседних временных интервалов в последовательностях оптических импульсов.

Именно эту разность мы и принимаем в качестве меры величини бокового ускорения ВОД. Знак этой разности (плюс или минус) будет определять направление проекции вектора ускорения (согласно или против направления ориентации соответствующей оси чувствительности акселерометра).

При появлении ускорения, вектор которого параллелен оси *OZ*, исходное положение равновесия маятника не изменится, а значит останутся равными нулю и упомянутые выше разности. Однако при этом изменится общая длительность периода обращения маятника и изменение именно этой величины может быть принято в качестве меры величины ускорения, действующего на ИВОД вдоль оси *OZ*.

Измерение временных интервалов и определение их разностей во всех каналах («Х», «Y» и «Z») акселерометра можно осуществлять путем подсчета числа высокочастотных импульсов, заполняя ими измеряемые временные интервалы [7]. Очевидно, период следования счетных импульсов должен быть высокостабильным во времени.

Таким образом, после каждого оборота конического маятника ИВОД схема обработки его сигнала выдает три числа, сопоставляя каждому из них соответствующую ему составляющую вектора ускорения вдоль каждой из пространственных осей, задаваемых зеркалами ИВОД.

Согласно принципу работы ИВОД все три отсчета (вдоль каждой из его осей чувствительности) являются нелинейными функциями соответствующих величин ускорений. Более того, действие на ИВОД ускорения вдоль оси *OZ* приводит к искажению отсчетов и вдоль других осей (при условии неизменности величин действующих ускорений). Однако при совместной обработке результатов отсчетов, можно получить неискаженные величины каждой из проекций произвольно ориентированного вектора ускорения [12]. Как следует из принципа роботы акселерометра, величина абсолютной погрешности измерения является постоянной во всем диапазоне измеряемых величин ускорений и определяется дискретой его счета (периодом генератора высокой частоты).

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Для облегчения получения количественной оценки метрологических возможностей акселерометра с ИВОД примем упрощающие допущения:

• вектор силы упругости на конце маятника лежит в плоскости *XOY*,

• масса консоли ВС пренебрежимо мала,

• инерционная масса является материальной точкой.

Принятые допущения позволяют рассматривать движение конца упругой консоли ВС с укрепленной на нем ИМ как движение материальной точки в плоскости *XOY* [16].

На рис. 6 представлена кинематическая схема ИВОД, на которой показаны силы, действующие на ИМ. Здесь: $\Phi = -ma$ — радиальная сила инерции Д'Аламбера, $\mathbf{a} = \ddot{\mathbf{r}} - центростреми$ тельное ускорение, $\mathbf{F}_{ynp} = A\mathbf{r} - сила упругости$ консоли BC как подвеса ИМ, $A = 3EI/L^3 -$ жесткость консоли ВС, Е — модуль Юнга для материала консоли BC (кварца), $I = \pi d^4/64$ — полярный момент инерции поперечного сечения консоли ВС, F_{вн} — внешняя (со стороны электромагнитов 4, см. рис. 4) периодическая сила, компенсирующая потери маятником собственной энергии, F_{сопр} — сила сопротивления, являющаяся диссипативной силой и возникающая как реакция среды на движение маятника (при малых скоростях движения ИМ эта сила пропорциональна скорости: $\mathbf{F}_{comp} = -\mu \mathbf{v} = -\mu \dot{\mathbf{r}}$), μ — коэффициент сопротивления среды, L, d — длина и диаметр консоли BC, **r** — радиус-вектор движения ИМ.

Для получения уравнения движения ИМ воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода. В общем случае это система уравнений, имеющих вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4



Рис. 6. Кинематическая схема ИВОД (обозначения см. текст)

где $L = T - \Pi$ — лагранжиан системы, представляющий собой разность кинетической и потенциальной энергий системы, q_j — обобщенная координата системи (j = 1, 2, ...), \dot{q}_j — временная производная обобщенной координаты.

Поскольку в рассматриваемой системе наряду с потенциальными действуют также и непотенциальные силы (например силы сопротивления, тормозящие движение маятника), то уравнения Лагранжа в этом случае записываются в виде

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{i}}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_{i}} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_{i}} + Q_{j}$$

где $-\frac{\partial \Pi}{\partial q_j}$ — обобщенные потенциальные силы системы, Q_j — обобщенные непотенциальные силы системы.

В нашем случае исследуемую систему можно рассматривать как имеющую только одну степень свободы, которой является радиус обращения ИМ. Именно его и следует взять в качестве обобщенной координаты: $q_j = r$. Тогда система уравнений Лагранжа сводится к одному уравнению вида:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{r}}\right) - \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{\partial \Pi}{\partial r} + Q, \qquad (13)$$

13

где $\Pi = \frac{Ar^2}{2}$ — потенциальная энергия упругой консоли BC, конец которой смещен от положения равновесия на величину *r*.

Определим вид входящих в уравнение (13) выражений применительно к нашему случаю:

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(\dot{r})^2}{2}, \ \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} = \frac{m}{2} \cdot 2\dot{r} = m\dot{r},$$
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{r}}\right) = \frac{d}{dt} (m\dot{r}) = m\ddot{r}, \ \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{m(\dot{r})^2}{2}\right) = 0,$$
$$\frac{\partial \Pi}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Ar^2}{2}\right) = Ar; \ Q = F_{con} = -\mu\dot{r}.$$
(14)

Подставляя (14) в (13), получаем уравнение движения ИМ:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = 0. \tag{15}$$

Наличие в уравнении (15) слагаемого µr свидетельствует о том, что рассматриваемая система диссипативна, а значит, описываемое этим уравнением движение конического маятника является затухающим. Диссипативной силой в этой системе является, в первую очередь, сила трения, обусловленная сопротивлением среды движению маятника («трение о воздух»). В некоторых случаях, например, при работе ИВОД в открытом космосе, от этой составляющей силы можно избавиться. Однако остается еще одна составляющая диссипативной силы, пусть и небольшая, но в нашем случае неуничтожимая сила внутреннего трения в материале упруго деформированной консоли ВС, возникающая в месте ее закрепления при движении маятника.

Для обеспечения незатухающего движения маятника в любых условиях эксплуатации ИВОД в его состав вводят электромагниты, расположенные так (рис. 4), что своим поочередным силовым действием ($F_{\rm BH}$) на ИМ компенсируют потери маятником собственной энергии. В таком случае уравнение (15) приобретает полный вид:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = F_{\rm BH} \,. \tag{16}$$

Вместе с тем, из сказанного выше следует, что по своему физическому смыслу, силовое действие электромагнитов уравновешивает диссипативные силы, т. е.

$$\mu \dot{r} = F_{\rm BH} ,$$

что дает возможность упростить (16):

$$m\ddot{r} + Ar = 0. \tag{17}$$

Проектируя уравнение (17) на оси зеркал ИВОД (рис. 4), получим:

$$m\ddot{x} = -Ax, \qquad \ddot{x} + \omega_x^2 = 0, m\ddot{y} = -Ay, \qquad \ddot{y} + \omega_y^2 = 0,$$
(18)

где $\omega^2 = A/m$ — собственная круговая частота свободного вращения маятника.

Решение системы (18) в общем случае имеет BUД $x = C \cos \omega t + C \sin \omega t$

$$x = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t,$$

$$y = C_2 \cos \omega t + C_4 \sin \omega t.$$
(19)

ния примем следующие начальные условия:

$$x(0) = 0, y(0) = R, \dot{x}(0) = V_0, y(0) = 0$$

Учитывая их, получаем

$$C_1 = 0, \ C_2 = V_0 / \omega, \ C_3 = R_0, \ C_4 = 0.$$

где $V_0 = (2W_{\kappa}/m)^{1/2}$ — линейная скорость движения ИМ, W_{κ} — ее кинетическая энергия.

Подставляя постоянные интегрирования в (19), получаем

$$x = (V_0 / \omega) \sin \omega t,$$

$$y = R_0 \cos \omega t.$$
(20)

Система уравнений (20) является параметрическим заданием траектории движения ИМ. Исключив из уравнений (20) параметр *t*, получим уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{(V_0/\omega)^2} + \frac{y^2}{R_0^2} = 1.$$
 (21)

В установившемся режиме (при условии симметрии силового действия на ИМ со стороны всех ЭМ) движение ИМ будет круговым, радиус которого может быть определен из (21):

$$R_{0} = \frac{V_{0}}{\omega} = V_{0} \sqrt{\frac{mL^{3}}{3EI}} .$$
 (22)

Из (22) легко найти период обращения маятника:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}.$$
 (23)

Рассмотрим реакцию ИВОД для случаев действия на него ускорения, вектор которого в первом случае параллелен плоскости *XOY* (рис. 4), а во втором — перпендикулярен к ней.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

В первом случае наличие пороговой величины ускорения $(a_{nop})_x$ обусловит смещение центра окружности, описываемой концом маятника, от начального положення на некоторую величину Δx_{nop} , при которой сила упругости консоли уравновесит Д'Аламберову силу инерции:

$$m \left(a_{\text{\tiny HOD}} \right)_x = A \cdot \Delta x_{\text{\tiny HOD}}.$$
 (24)

Принимая во внимание, что при пороговой величине ускорения $\Delta x_{\text{пор}} < R_0$, из рис. 7 выразим связь $\Delta x_{\text{пор}} c \Delta t_{\text{пор}}$:

$$\Delta t_{\rm nop} \approx \frac{T_0}{2\pi} \cdot \frac{\Delta x_{\rm nop}}{R_0} \,. \tag{25}$$

Условие регистрации $(a_{nop})_x$ может быть представлено следующим образом:

$$\Delta \tau_{\rm nop} = T = 1/f_{\rm ren} = 4\Delta t_{\rm nop}$$

Здесь $\Delta \tau_{\text{пор}}$ — разность времен пребывания конца конического маятника по обе стороны оси кривизны *ОY* цилиндрического зеркала (рис. 4), с другой стороны, $\Delta \tau_{\text{пор}}$ может быть интерпретирована как разность длительностей двух соседних временных интервалов в последовательности оптических импульсов, создаваемых этим зеркалом (рис. 5, *б*, частный случай: $a_x \neq 0$, $a_{y,z} = 0$), *T* и $f_{\text{ген}}$ — соответственно период и частота колебаний высокочастотного стабилизированного генератора счетных импульсов.

Из выражений (23) и (25) определим пороговую чувствительность акселерометра в направлении оси чувствительности ОХ:

$$(a_{\rm nop})_{x} = \frac{R_{0}}{4f_{\rm reH}} \cdot \left(\frac{3EI}{mL^{3}}\right)^{3/2} = 2\pi^{3} \frac{R_{0}}{f_{\rm reH}T_{0}^{3}}.$$
 (26)

Максимальная величина ускорения вдоль оси *OX*, которая может быть измерена акселерометром, определится, очевидно, из соотношения

$$(a_{\max})_x = \frac{3EI}{mL^3} R_0 = \frac{4\pi^2}{T_0^2} R_0.$$
 (27)

Соответственно динамический диапазон ускорений, измеряемых вдоль оси *OX*, равен

$$N_{x} = \frac{(a_{\max})_{x}}{(a_{\max})_{x}} = \frac{2}{\pi} f_{\text{reh}} \cdot T_{0} .$$
 (28)

Очевидно, что все результаты, полученные для оси OX, в полной мере могут быть отнесены и к оси OY.





Рис. 7. К расчету реакции ИВОД при действии на него ускорения (см. текст)

Быстродействие акселерометра определяется, очевидно, периодом обращения маятника T_0 (23).

Если вектор ускорения, оставаясь параллельным плоскости *XOY*, изменяет свою ориентацию относительно осей *OX* и *OY*, то ненулевой результат будет получен уже в двух каналах «Х» и «Y» (рис. 5, δ), и полная величина вектора ускорения и его направление определится как векторная сумма величин его проекций, полученных в каналах «Х» и «Y».

Следующий случай (вектор ускорения параллелен оси *OZ*) (рис. 5, *в*) принципиально отличается от только что рассмотренных, поскольку информационным параметром здесь выступает сама длительность периода обращения маятника, измеряемая в третьем, «Z»-канале акселерометра. Выражение, определяющее период обращения маятника в этом случае, имеет вид:

$$T = 2\pi \cdot \left(\frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{a_Z}{L}\right)^{-1/2}.$$
 (29)

Знак «минус» внутри скобок соответствует случаю совпадения направления вектора ускорения с положительным направлением оси *OZ*.

В соответствии с выражением (29) условие регистрации порогового ускорения вдоль оси *OZ* будет иметь вид

$$\frac{1}{f_{\text{ген}}} = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{3EI}{mL^3} \right)^{-1/2} - \left(\frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{(a_{\text{пор}})_z}{L} \right)^{-1/2} \right].$$
(30)

Принимая во внимание, что $\frac{(a_{пор})_z}{L} \ll \frac{3EI}{mL^3}$, и используя формулы приближенных вычислений, упростим (30):

$$(a_{\text{пор}})_{z} \approx \frac{L}{\pi f_{\text{ген}}} \cdot \left(\frac{3EI}{mL^{3}}\right)^{3/2} = \frac{8\pi^{2}L}{f_{\text{ген}}T_{0}^{3}}.$$
 (31)

При определении максимальной величины ускорения $(a_{\max})_z$, которое может быть измеренным вдоль оси *OZ*, сталкиваемся с определенными трудностями из-за отсутствия четких физических ограничений и на саму ее величину, и на возможность ее определения. Примем в качестве $(a_{\max})_z$ такую ее величину, при которой период обращения маятника уменшится вдвое (понятно, что это условие не является жестким):

$$(a_{\max})_z = 9 \cdot \frac{EI}{mL^2} = \frac{12\pi^2 L}{T_0^2}.$$
 (32)

Соответственно динамический диапазон ускорений, измеряемых вдоль оси *OZ*, определится выражением

$$N_{z} = \frac{(a_{\max})_{z}}{(a_{\max})_{z}} = \pi f_{\text{reH}} \sqrt{\frac{3mL^{3}}{EI}} = \frac{3\pi}{2} f_{\text{reH}} \cdot T_{0} .$$
(33)

Как видно из полученных выражений, основные метрологические параметры рассмотренного акселерометра могут быть легко изменены в широких пределах путем соответствующего выбора конструкционных параметров ИВОД и частоты генератора счетных импульсов. Так, используя для подвеса маятника стандартний ВС типа «кварц-кварц» с наружным диаметром (по кварцу) 125 мкм ($E = 7 \cdot 10^{10}$ H/м², $I = 1.2 \cdot 10^{-17}$ м⁴) и приняв L = 1 см, m = 0.1 г, $R_0 = 2$ мм и $f_{ren} = 5 \cdot 10^7$ Гц, из выражений (23), (26)—(28), (31)—(33) получаем

$$(a_{nop})_{x,y} = 4 \cdot 10^{-6}g, \ (a_{max})_{x,y} = 5.0g, \ N_{x,y} = 1.2 \cdot 10^{6},$$

 $(a_{nop})_{z} = 2 \cdot 10^{-5}g, \ (a_{max})_{z} = 75g, \ N_{z} = 3.5 \cdot 10^{6},$
 $T_{0} = 4 \cdot 10^{-2}c.$

А приняв L = 10 см и m = 10 г (при незменных других значениях) получим

 $(a_{\text{nop}})_{x,y} = 1.2 \cdot 10^{-13} g, \ (a_{\text{max}})_{x,y} = 5 \cdot 10^{-5} g, \ N_{x,y} = 4 \cdot 10^8,$ $(a_{\text{nop}})_z = 8 \cdot 10^{-12} g, \ (a_{\text{max}})_z = 7.5 \cdot 10^{-3} g, \ N_z = 9 \cdot 10^8,$ $T_0 = 12.5 \text{ c.}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный на основе ИВОД 3-координатный акселерометр-гравиметр имеет высокие технические характеристики. Он может стать основой бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) для космических летательных аппаратов (КЛА) [18].

Такие БИНС позволят осуществлять:

– непосредственный контроль изменений параметров орбит или траекторий полета, вызываемых действием на КЛА сверхмалых, но длительно действующих (например, в течение всего времени полета) внешних силовых факторов (тормозное действие остатков атмосфер планет, давление «солнечного ветра» и т. п.),

 контролированную коррекцию параметров орбит (траекторий) КЛА путем включения маломощных бортовых двигателей или разворачиванием «солнечных парусов» [9],

 исследование влияния контролированных уровней микрогравитации на характер протекания различных физико-химических и биологических процесов.

Так, дрейф КЛА только под действием на него «солнечного ветра» за время его перелета от Земли до Марса, может сместить от расчетной точку его выхода на активный участок заключительной траектории полета на величину до 100 тисяч километров.

Высокая чувствительность и разрешающая способность таких измерителей позволяют также создавать на их основе градиентометры реальных конструкций (с базой в единицы метров) для исследования неоднородностей гравитационного поля Земли или других планет непосредственно с орбит их искусственных спутников, что открывает возможности практического решения ряда важных научных и технических задач.

Разработанный акселерометр может быть использован также в качестве высокочувствительного гравиметра для проведения геофизических исследований [8]. В частности, с его помощью можно:

 проводить экспериментальную проверку стабильности положения центра масс Земли или других планет,

- измерять смещение полюсов Земли,

измерять гравитационную постоянную.

Такие гравиметры с орбиты искусственного спутника способны фиксировать локальные отклонения напряженности гравитационного поля, обусловленные неоднородностями объемной плотности земной коры, причиной которых может быть залегание там полезных ископаемых, плотность которых заметно отличается от средних значений, присущих данному региону (например, залежи руд тяжелых металлов, газа, нефти, воды и т. п.)

Вважным применением таких измерителей может быть мониторинг сейсмической ситуации в застроенных районах городов с подземным метрополитеном.

- 1. Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. — 2005. — 46, № 6. — С. 128—140.
- 2. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Потапов В. Т., Чаморовский Ю. К. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы // Фотон-Экспресс. — 2005. — 46, № 6. — С. 114—127.
- 3. Демьяненко П. А. Предельные возможности аналоговых оптических датчиков в составе ВОС // Радиотехника. — 1988. — № 2. — С. 88—90.
- 4. Демьяненко П. А. Повышение точности измерений в волоконно-оптических системах измерения с оптическими датчиками // Радиотехника. 1991. № 2. С. 83—85.
- 5. Демьяненко П. А. Точность измерений посредством волоконно-оптических датчиков (проблеми и пути их решения) // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1995. Вып. 29. С. 88—93.
- 6. Демьяненко П. А., Зиньковский Ю. Ф., Прокофьев М. И. Прецизионный цифровой акселерометр с волоконнооптическим датчиком // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. — 1997. — **40**, № 1. — С. 39—47.
- 7. Демьяненко П. А., Зиньковский Ю. Ф., Прокофьев М. И. Обработка сигналов в измерителях с импульсными волоконно-оптическими датчиками // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. — 1998. — 41, № 8. — С. 54—60.
- Дем'яненко П. О., Зіньковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Цифровий прецизійний волоконно-оптичний гравіметр // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 1997. — Вип. 58. — С. 239—241. — (Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика — сучасні технології і перспективи розвитку: Матер. І Міжнарод. науковотехнічної конф., 9—14 червня 1997 р., Львів, Державний університет «Львівська політехніка»).

- Дем'яненко П. О., Зіньковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Волоконно-оптичний давач для акселерометрів космічних навігаційних систем // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі: Матер. IV Міжнарод. науково-технічної конф. — Житомир: Житомирський інженерно-технологічний інститут, 1999. — С. 165—168.
- Дем'яненко П. О., Зіньковський Ю. Ф. Методологічні аспекти тлумачення феномену дифракції світла // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2008. — № 36. — С. 132—140.
- 11. *Жижин В*. Волоконно-оптические датчики: перспективы промышленного применения // Электронные компоненты. 2010. № 12. С. 17—23.
- Зиньковський Ю. Ф. Демьяненко П. О., Прокофьев М. И. Измерительные преобразователи на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. — 2005. — 46, № 6. — С. 181—187.
- 13. *Моисеев В. В., Потапов В. Т.* Исследование стабильности волоконно-оптического датчика «отражательного» типа // Радиотехника. 1988. № 8. С. 37—40.
- 14. Окоси Т., Окамото К., Оцу М. и др. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
- Пат. 2146373 Российской федерации МКЛ G 01 Р 15/08. Волоконно-оптический датчик ускорения / П. А. Демьяненко, М. И. Прокофьев. — Приоритет от 02.08.95. — Выдан 10 марта 2000 г.
- 16. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости / Пер. с англ. под ред. Г. С. Шапиро. М.: Наука, 1979. 560 с.
- 17. Фара Т., Герлен К., Ландражен А. и др. Транспортируемый гравиметр на холодных атомах разработки LNE-SYRTE: работа в подземных условиях в режиме наилучшей чувствительности // Гироскопия и навигация. 2014. **86**, № 3. С. 3—14.
- Dem'yanenko P. A., Zinkovskiy Yu. F., Prokof'ev M. I. Digital precision sensor of superlow accelerations // Космічна наука і технологія. — 2000. — 6, № 4. — С. 27— 28.
- Hasegawa A., Kodama Y. Guiding-center soliton in fibers // Opt. Lett. – 1990. – 15, N 24. – P. 1443–1445.
- Soref R., McMahon D. H. Tilting-mirror fiber optic accelerometer // Appl. Opt. 1984. 23. P. 486–491.
- Spillman W. D. Multimode fiber optic accelerometer based on the photoelastic effect // Appl. Opt. – 1982. – 21. – P. 2653–2658.
- 22. Van As H. R. Im Gigabit-Rausch // Bus. Comput. 1996. N 6. S. 81–83.
- Webb S. M., Guild K. M., Sian S. S. 337 km unrepeatered transmission at 10 Gbit/s with Raman amplification and clock prechirp // Electron. Lett. - 1996. - 32, N 9. -P. 827-829.

Стаття надійшла до редакції 12.05.14

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

П. О. Дем'яненко, Ю. Ф. Зіньковський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАВАЧІ З ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ

Досліджується проблема метрологічно низьких можливостей вимірювачів на основі аналогових волоконнооптичних датчиків (ВОД), аналізуються її причини та обгрунтовується перехід до імпульсних (дискретних) принципів модуляції параметрів оптичного потоку в ВОД. Для цього в оптичний потік вводяться додаткові, неоптичні, параметри, на які перекладається додаткові, неоптичні, параметри, на які перекладається роль реципієнтів інформації і з яких ця інформація може бути відтвореною з потрібною точністю. Розроблена схема конструкції ВОД з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку (ІВОД), проведені метрологічні розрахунки параметрів вимірювача лінійних прискорень, побудованого на основі ІВОД.

Ключові слова: волоконно-оптичні давачі прискорення, імпульсна модуляція, волоконно-оптичні акселерометри.

P. O. Demianenko, Yu. F. Zinkovski

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

FIBER-OPTIC SENSORS WITH A PULSE-MODULATED OPTICAL FLOW

We investigate the problem of metrologicaly low capabilities of the analog gauges on the basis of fiber-optic sensors (FOS) as well as analyze the reasons and justify the transition to the pulse (discrete) principles of modulation parameters of the optical flow in FOS. For this purpose, the additional, non-optical parameters, which shifted the role of recipient of information, and from which this information may be reproduced with the required accuracy, could be added to the optical flow. The schematic of a FOS design is developed. Metrological calculation of linear acceleration meter based on IFOS is performed and discussed.

Key words: fiber-optic acceleration sensors, pulse modulation, fiber optic accelerometers. УДК 520.36

А. П. Відьмаченко, Ю. С. Іванов, І. І. Синявський

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

РОЗРОБКА ПОЛЯРИЗАТОРА ЗОБРАЖУВАЛЬНОГО ПОЛЯРИМЕТРА НА ОСНОВІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПЛІВОК

Провадяться роботи зі створення спектрометра-поляриметра ПМ-СП, який заплановано як один з п'яти приладів, що входять до складу наукової апаратури російсько-українського космічного експерименту «Планетний моніторинг». Прилади призначено для формування у фокальній площині планетного телескопа (ПТ-600) зображення небесних об'єктів та реєстрації спектральної і поляриметричної інформації про газово-аерозольні складові атмосфер планет та фізико-хімічні характеристики поверхневих шарів безатмосферних астрономічних тіл. Розроблено макет поляризатора на основі поляризаційних плівок, що може використовуватися у спектрометрі-поляриметрі. Також приведено результати дослідження вказаного елементу у спектральному діапазоні 420...850 нм.

Ключові слова: зображувальний поляриметр, спектрометр-поляриметр, поляризатор, поляризаційні плівки, астрономічні спостереження.

ВСТУП

Поляриметричні спостереження є актуальними для астрофізики і дозволяють визначати просторову структуру речовини, магнітних полів, космічного пилу. Зазначені вимірювання також дають можливість визначати значення комплексного показника заломлення аерозольних часток, розподіл їх за розмірами, відносний вміст аерозолю, а також вивчати механізми, що забезпечують кореляцію змін властивостей планетних атмосфер з сонячною активністю [6]. Поляризацію світлової хвилі можна повністю описати чотирма параметрами, відомими як компоненти вектора Стокса [11]. Авторами у роботах [1, 2] запропоновано концепцію побудови астрономічного спектрополяриметра, згідно з якою був розроблений прилад, що використовується в Головній астрономічній обсерваторії (ГАО) НАН України. Поляризація аналізується модуляційним методом

за допомогою фазової пластинки, що обертається. Однак при спостереженнях швидкоплинних процесів необхідно провадити вимірювання одночасно при великому куті зору. Це стосується і випадків, де можливість використання рухомих частин у приладі дуже обмежена, наприклад у приладах для космічних експериментів. Такі завдання можуть вирішувати зображувальні поляриметри. У ГАО НАН України розробляється зображувальний спектрополяриметр для малого телескопа «Celestron», що дозволяє вимірювати три параметри вектора Стокса одночасно. Нижче описано результати розробки поляризаційного елемента для вказаного приладу.

ВАРІАНТИ ПОБУДОВИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ПОЛЯРИМЕТРІВ

€ декілька варіантів побудови астрономічних поляриметрів, які можна розділити за методом отримання інформації на: 1) поляриметри, основані на поділі падаючого випромінювання на вхід приладу по амплітуді, із застосуванням

[©] А. П. ВІДЬМАЧЕНКО, Ю. С. ІВАНОВ, І. І. СИНЯВСЬКИЙ, 2015



Рис. 1. Оптична схема зображувального поляриметра: 1 — коліматор, 2 — поляризатор, 3 — площина вихідної зіниці, 4 — система клинів для розведення зображень, 5 — змінні фільтри або дифракційна решітка, 6 — камерний об'єктив, 7 — приймач. А — вид на зіницю до встановлених по секторах чотирьох поляроїдних плівок

обертового поляризаційного елементу; 2) поляриметри, основані на поділі падаючого випромінювання на вхід приладу по амплітуді без обертових елементів; 3) поляризатори, основані на просторовому розділенні падаючого випромінювання на вхід приладу по апертурі.

Класична схема поляриметру першого типу фазова пластинка, що обертається і аналізатор (як правило, двопроменевий елемент — призма Волластона, що розводить випромінювання на два пучки з ортогональними складовими). Особливості поляриметрів, заснованих на такому методі, добре описані в роботах [5, 10]. Аналіз поляризації у таких поляриметрах виконується модуляційним методом. У роботі [8] описано схему побудови фотополяриметра, що дозволяє вимірювати чотири параметри вектора Стокса одночасно. Це досягається шляхом розділення вхідного випромінювання світлоподілювачем зі спеціальним покриттям, розташованим до призми Волластона, що дозволяє розділяти випромінювання на компоненти лінійної та кругової поляризації. За таким принципом будуються поляриметри другого типу. У національному університеті Ірландії розроблено високошвидкісний зображувальний Стокс-поляриметр — GASP (Galway Astronomical Stokes Polarimeter) для дослідження швидких (10-6 с) варіацій в астрономічних об'єктах [4]. Поляриметр не має рухомих частин, всі параметри вектора Стокса можуть бути виміряні за одну експозицію. Проте зазначений поляриметр за принципом побудови оптичної схеми не може мати велику світлосилу, має мале поле зору і придатний для спостереження поодиноких небесних об'єктів. Третій тип поляриметрів заснований на поділі апертури. Схеми побудови таких поляриметрів наведені в роботах [7, 12]. Автори, на наш погляд, не дали чіткої відмінності між варіантами побудови поляриметрів зазначеного типу. Під діленням апертури ми будемо розуміти просторовий (як правило — секторний) поділ вихідної зіниці оптичної системи, поблизу якого встановлюються елементи, що аналізують характеристики випромінювання.

ОПТИЧНА СХЕМА ЗОБРАЖУВАЛЬНОГО ПОЛЯРИМЕТРА

Авторами в роботі [3] запропоновано концепцію побудови оптичної системи зображувального поляриметра, що дозволяє проводити вимірювання трьох компонентів вектора Стокса одночасно, в широкому полі і без обмежень по відносному отвору системи. Запропонована схема також дозволяє вимірювати всі компоненти вектора шляхом введення в сектори зіниці фазових пластин $\lambda/2$ і $\lambda/4$, але за специфікою поставлених задач реєстрація четвертого компонента вектора Стокса в запропонованому приладі не проводиться. Оптична система приладу складається з коліматора, поляризаційного елемента, системи розведення зображень, камерного об'єктива і приймача зображень, а також змінних фільтрів або дифракційної решітки.

На рис. 1 показано схему по двох каналах (верхньому і нижньому).

Поляризатор. Для аналізу лінійної поляризації необхідно виконати чотири вимірювання інтен-

сивності випромінювання, що пройшло через лінійні поляризатори:

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \end{pmatrix},$$
(1)

де I_0 , I_{90} , I_{45} , I_{-45} — інтенсивності випромінювання відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями та з поляризацією під кутом 45° і –45°.

В описуваному приладі запропоновано використовувати складовий поляризатор, що складається з чотирьох плівкових поляризаторів з позиційними кутами 0°, 45°, 90°, 135°. Схему такого складового поляризатора, встановленого поблизу зіниці телескопа, представлено на рис. 2.

У загальному випадку можливі різні варіанти реалізації таких модуляторів. Перший з них — застосування пари двопроменевих поляризаційних призм [4], оптичні осі яких розвернуті під кутом 45° і заповнюють сектори 1—2 і 3—4 відповідно, і мають ефективність, близьку до 100 %. Така призма (Wedged double Wollaston) була запропонована в роботі [9]. Однак власна дисперсія призм вимагає введення додаткових компенсаційних клинів і все ж не може дати якісне зображення у великому полі зору і широкому спектральному діапазоні. Крім того, дисперсія призм різна для двох ортогональних напрямків поширення світла, що призводить до неідентичності зображень. В іншому варіанті такого поляризатора використовуються тонкі поляризаційні плівки. Порівняно з призмами плівки програють у пропусканні, але в широкому полі зору, при врахуванні віньєтування косих променів на межі сполучення призм, плівки, маючи меншу товщину, виграють порівняно з двопроменевими призмами.

дослідження поляризатора

В лабораторії астрокосмічного приладобудування ГАО НАН України було розроблено складений поляриметр на основі комерційних поляризаційних плівок компанії Edmund Otics (http:// edmundoptics.com). Вказані плівки були орієнтовані з потрібними з позиційними кутами 0°, 45°, 90°, 135°, а потім заклеєні між двома захисними вікнами.



Рис. 2. Секторний поляризатор зображувального поляриметра. Орієнтації поляризаційних елементів: $1 - 0^\circ$, $2 - 90^\circ$, $3 - 45^\circ$, $4 - 135^\circ$



Рис. 3. Зображення складового поляроїда на основі поляризаційних плівок

На рис. 3 представлено зображення вказаного складеного поляризатора. Ступінь затемнення того чи іншого сектора ілюструє роботу поляризаційного елемента. Повне затемнення у секторі — вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно перпендикулярні, світлий сектор — вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно паралельні.

Для дослідження властивостей складового поляризатора був використаний стенд, що складався з таких елементів (за ходом променя в оптичній системі): 1) джерело випромінювання, 2) модулятор світла, 3) монохроматор, 4) поляризаційна призма Глана, 5) поляризатор, що досліджується, 6) приймач випромінювання, 7) аналізатор сигналу. Було проведено аналіз поляризаційних характеристик плівок у спектральному діапазоні 420...850 нм, а саме — спектральна залежність остаточного пропускання при схрещеному по-



Рис. 4. Характеристики спектральної залежності коефіцієнта пропускання двох лінійних поляризаторів при розташуванні їхніх оптичних осей під кутом 90°: 1 — дві призми Глана, досліджені на стенді, 2 — дві поляризаційні плівки (за даними виробника), 3 — сектор виготовленого в ГАО НАН України складеного поляризатора та призма Глана

ложенні поляризаційної призми Глана (що була прийнята за еталон) та досліджуваного поляризатора. Перед початком досліджень поляризатора в хід променів була встановлена додаткова призма Глана для перевірки достовірності даних, одержаних за допомогою стенду. Як показано на діаграмі, в схрещених призмах Глана коефіцієнт пропускання становить менше 0.1 %.

Також результати досліджень показали, що заявлені характеристики виробником поляризаційних плівок дещо відрізняються від результатів, одержаних під час вимірювань. Головним чином це стосується короткохвильової частини спектру (рис. 4).

висновки

Розроблено поляризатор на основі поляроїдних плівок, що може використовуватися в зображувальних поляриметрах з великими полями зору та в широкому спектральному діапазоні. Однак при дослідженнях його характеристик виявлено значні відхилення реальних параметрів поляроїдних плівок від анонсованих виробником. Дані відхилення мають бути аналізовані для усунення або компенсації до прийнятних величин. Для цього розроблений випробувальний стенд має бути дороблений з метою збільшення його чутливості. Роботу виконано за фінансової підтримки в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

- 1. Видьмаченко А. П., Иванов Ю. С., Мороженко А. В. и др. Спектрополяриметр наземного сопровождения космического эксперимента «Планетный мониторинг» // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 1. — С. 63—70.
- Иванов Ю. С., Синявский И. И., Сосонкин М. Г. Астроспектрополяриметры для слабых объектов // Оптич. журн. — 2006. — 73, № 12. — С. 63—67.
- 3. Синявский И. И., Иванов Ю. С., Видмаченко А. П. Конценция построения оптической схемц панорамного Стокс-поляриметра для малых телескопов // Оптич. журн. — 2013. — **80**, № 9. — С. 27—32.
- Collins P., Redfern R. M., Sheeha B. Design. Construction and calibration of the Galway Astronomical Stokes Polarimeter (GASP) // AIP Conf. Proc. – 2008. – 984. – P. 241–246.
- Gandorfer A. M., Steiner P., Povel H. P., et al. Solar polarimetry in the near UV with the Zurich Imaging Polarimeter ZIMPOL II // Astron. and Astrophys. 2004. 422, N 2. P. 703–708.
- Hough J. H. New opportunities for astronomical polarimetry // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2007. – 106, N 1–3. – P. 122–132.
- Meriaudeau F., Ferraton M., Stolz C., et al. Polarization imaging for industrial inspection // Proc. SPIE. – 2008. – 6813. – P. 681308-1 – 681308-10.
- Mudge J., Virgen M., Dean P. Near-infrared simultaneous Stokes imaging polarimeter // Proc. SPIE. – 2009. – 7461. – P. 74610L-1 – 74610L-6.
- Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1997. – 123, N 3. – P. 589–592.
- Ramaprakash A. N., Gupta R., Sen A. K., Tandon S. N. An imaging polarimeter (IMPOL) for multi-wavelength observations // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1998. – 128, N 3. – P. 369–375.
- Stokes G. G. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources // Trans. Cambridge Philos. Soc. – 1852. – 9. – P. 399–416.
- Tyo J. S, Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // Appl. Opt. 2006. 45, N 22. P. 5453–5469.

Стаття надійшла до редакції 17.12.14

А. П. Видьмаченко, Ю. С. Иванов, И. И. Синявский

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

РАЗРАБОТКА ПОЛЯРИЗАТОРА ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ПОЛЯРИМЕТРА НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПЛЕНОК

Проведена работа по созданию спектрометра-поляриметра ПМ-СП, который запланирован как один из пяти приборов, входящих в состав научной аппаратуры российско-украинского космического эксперимента «Планетный мониторинг». Приборы предназначены для формирования в фокальной плоскости планетного телескопа (ПТ-600) изображения небесных объектов и регистрации спектральной и поляриметрической информации о газово-аэрозольных составляющих атмосфер планет и физико-химических характеристиках поверхностных слоев безатмосферных астрономических тел. Разработан макет поляризатора на основе поляризационных пленок, который может использоваться в спектрометрах-поляриметрах. Также приведены результаты исследования указанного элемента в спектральном диапазоне 420...850 нм.

Ключевые слова: изображающий поляриметр, спектрометр-поляриметр, поляризатор, поляризационные пленки, астрономические наблюдения. A. P. Vidmachenko, Yu. S. Ivanov, I. I. Syniavskyi

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

THE DEVELOPMENT OF THE IMAGING POLARIMETER'S POLARIZER ON THE BASIS OF THE POLARIZING FILM

Development of the "Spectrometer polarimeter" scientific instrument has started, which is planned to be the one of five devices in the Russian-Ukrainian "Planetary Monitoring" space experiment. The devices are designed to form images of celestial objects in the focal plane of a planetary telescope (PT-600) and to register spectral and polarimetric information on gaseous and aerosol components of the planetary atmospheres as well as physical and chemical properties of the surface layers of atmosphereless astronomical bodies. A mockup of a polarizer that is based on the polarizing films has been designed. This model can be used in the spectrometerpolarimeter. The results of the investigation of the polarizer in the spectral range 420–850 nm are given.

Key words: imaging polarimeter, spectrometer-polarimeter, polarizer, polarizing film, astronomical observations.

УДК 621.396.677

А. А. Кириленко, А. О. Перов, В. Н. Скресанов, С. А. Стешенко, В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, А. И. Шубный Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ПРИЕМНЫХ ФОКАЛЬНЫХ БЛОКОВ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ VLBI2010-СЕТИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: СИНТЕЗ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложена новая конфигурация и разработана строгая электродинамическая модель трехдиапазонного S/X/Ка-облучателя для зеркальной антенны VLBI2010 совместимых радиотелескопов. Результаты получены в соответствии с календарным планом первого этапа договора № 8/14 от 05.03.14, который выполняется ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины по распоряжению Президиума НАН Украины № 140 от 04.03.14.

Ключевые слова: РСДБ, радиотелескоп, зеркальная антенна, охлаждаемый S/X/Ка-облучатель, диаграмма направленности, круговая поляризация, система электродинамического моделирования.

введение

Конечной целью работ по проекту «Многочастотный облучатель зеркальной антенны для криогенных приемных фокальных блоков (КПФБ) радиотелескопов VLBI2010-сети нового поколения: синтез, проектирование, эксперимент», выполнение которого рассчитано на три года, является разработка трехдиапазонного облучателя с улучшенными показателями качества для зеркальных антенн, совместимых со стандартами, принятыми в рамках международной программы VLBI2010 [9]. Данная программа была разработана международной службой геодезии и астрометрии (IVS) с целью развития сети станций, предназначенных для решения комплекса новых задач астрометрии, геодезии и навигации методами радиоинтерферометрии со сверхдлин-

24

ной базой (РСДБ, или VLBI — Very Long Baseline Interferometry).

Одна из таких задач, относящаяся к технологиям космической отрасли, - определение параметров вращения Земли и координат опорных станций с погрешностями порядка одного миллиметра, а также оперативное определение всемирного времени в интересах глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS, GNSS) с погрешностью порядка 10 мкс [2]. Необходимость коренного переоборудования технических средств действующих VLBI-сетей обусловлена в том числе и тем, что требования к точности координатно-временного и навигационного обеспечения ГЛОНАСС, GPS, GNSS стали сравнимыми с требованиями координатно-временного обеспечения фундаментальных исследований в астрофизике. Например, если требуемая погрешность определения координат с помощью глобальной навигационной системы составляет тридцать сантиметров, то погреш-

[©] А. А. КИРИЛЕНКО, А. О. ПЕРОВ, В. Н. СКРЕСАНОВ, С. А. СТЕШЕНКО, В. В. ГЛАМАЗДИН, М. П. НАТАРОВ, А. И. ШУБНЫЙ, 2015

ность определения координат опорных станций должна быть не хуже трех сантиметров. Этого, в свою очередь, можно достичь если комплекс средств прогнозирования и определения параметров вращения Земли будет обеспечивать точность определения 0.1 мс дуги для координат полюса, углов нутации и прецессии и 10 мкс для всемирного времени.

Предполагается, что к 2017 г. в мировую VLBI2010-сеть будет входить до 20 опорных станций наблюдения, расположенных на различных континентах [6], две из которых будут развернуты в обсерваториях Бадары и Зеленчукская. КПФБ для этих телескопов, который также включает в себя разделители круговых поляризаций и охлаждаемые малошумящие усилители, был разработан при участии авторов данной работы [3, 12].

Облучатель разрабатывается под геометрию двухзеркальной антенны фирмы "Vertex Antennentechnic GmbH" с диаметром основного зеркала 13.2 м. Антенные системы, выполненные в рамках таких требований, использовалась и в других проектах — в реализованном в 2012 г. проекте в Германии [7] и в находящемся на стадии завершения проекте RAEGE в Испании [8]. Радиотелескопы предназначены для приема радиоизлучений квазаров в трех диапазонах частот: в S-диапазоне (2.2-2.6 ГГц), в Х-диапазоне (7.0—9.5 ГГц) и в Ка-диапазоне (28—34 ГГц). Диаграммы направленности (ДН) трехчастотного S/X/Ка-облучателя с единым фазовым центром на рабочей и ортогональной круговых поляризациях зависят от геометрии зеркальной системы и, в свою очередь, в значительной степени определяют SEFD (System Equivalent Flux Density) и пространственное распределение коэффициента эллиптичности антенной системы в целом. Эти показатели принадлежат к основным, характеризующим качество радиотелескопов в сети VLBI2010. Определено, что в каждом из трех диапазонов частот:

• ширина ДН на рабочей круговой поляризации по уровню минус 16 дБ должна быть $130 \pm 5^{\circ}$;

• уровень ДН на ортогональной круговой поляризации не должен превышать минус 22 дБ по

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

отношению к уровню ДН на рабочей поляризации вдоль оси облучателя;

• отклонение фазы комплексной ДН в секторе $\pm 65^{\circ}$ относительно единого фазового центра облучателя не должно превышать 20°;

• уровень обратных потерь не должен превышать минус 20 дБ.

Как было нами показано, для облучателя [3] сформулированные требования выполняются не в полной мере, и улучшение характеристик облучателя остается актуальной задачей. Результаты разработки усовершенствованного облучателя по данному проекту могут быть востребованы разработчиками подобных систем в Германии [7] и в Испании [8]. Украина также обладает радиотелескопами, которые при соответствующей доработке облучателя могли бы функционировать в составе всемирной VLBI-сети.

В данной работе нами исследованы причины снижения показателей качества облучателя [3] и, как следствие, предложено усовершенствованное техническое решение облучателя. Помимо этого наш опыт синтеза двух и трех диапазонных облучателей радиотелескопов с заданными характеристиками [1, 10] показал плодотворность использования быстрых численно-аналитических алгоритмов метода частичных областей в сочетании с методами градиентной оптимизации. Синтез выполнялся с использованием системы электродинамического моделирования MWD II [4, 5]. Данная система, однако, не может быть применена для синтеза предложенного облучателя в полной конфигурации, поскольку в ней до настоящего времени отсутствовали ключевые элементы для анализа диэлектрических вставок в волноводах. Разработка таких ключевых элементов была выполнена как первый этап данного проекта и введена в систему MWD II, что позволило создать полную математическую модель S/X/Ка-облучателя.

КОНФИГУРАЦИЯ S/X/КА ОБЛУЧАТЕЛЯ В СОСТАВЕ КФПБ

Предложенное нами техническое решение апертурного узла КПФБ представлено на рис. 1. Опишем кратко назначение элементов конструкции. Круглый волновод *1* Ка-диапазона и коаксиа-



Рис. 1. Техническое решение апертурного узла КПФБ: 1 — круглый волновод Ка-диапазона, 2 — коаксиал Х-диапазона, 3 — коаксиал S-диапазона, 4 — облучатель Ка-диапазона, 5 — облучатель Х-диапазона, 6 — облучатель S-диапазона, 7 — радиационный экран, 8 — трехслойный ИК-фильтр, 9 — корпус криостата, 10 — четырехслойное вакуумное окно, 11 — радиопоглощающее кольцо, 12 — фланец криостата, 13 — прижимное кольцо

лы 2 и 3 Х- и S-диапазонов связаны, соответственно, с облучателями 4, 5 и 6 диапазонов посредством согласующих трансформаторов в виде кольцевых диафрагм и образуют собственно S/X/Ka-облучатель. Ka-облучатель 4 представляет собой диэлектрический конус, выступающий из открытого конца круглого волновода 1. Облучатели 5 и 6 в Х- и S-диапазонах представляют собой открытые коаксиальные полости, снизу ограниченные трансформаторами. Кольцевые канавки в торцах внешних проводников коаксиалов служат для симметрирования ДН в E- и H-плоскостях.

S/X/Ka-облучатель, находящийся при температуре 15—20 К, помещен в цилиндрический радиационный экран 7, который сверху заканчивается трехслойным ИК-фильтром 8. Радиационный экран и ИК-фильтр имеют температуру порядка 60 К и служат для ослабления тепловых радиационных потоков. Именно необходимость введения в конструкцию КПФБ металлического радиационного экрана 7 с многослойным ИКфильтром 8 в торце дали возможность построить электродинамическую модель S/X/Ka-облучателя в виде многоступенчатой декомпозиционной схемы, опирающейся на быстрый расчет многомодовых волноводных матриц рассеяния, отдельных ключевых элементов и собственно облучателя и подводящих волноводных трактов.

S/X/Ka-облучатель с радиационным экраном целиком размещен в корпусе 9 криостата. Радиоизлучение фокусируется антенной в фазовом центре облучателя, расположенном внутри криостата через радиопрозрачное многослойное вакуумное окно 10. Вакуумное окно с внешней стороны должно быть защищено вакуум-плотной (полиэтилентерефталат толщиной 0.05 мм) и гидрофобной (фторопласт толщиной 0.1 мм) пленками. Вакуумное окно 10 через радиопоглощающее кольцо 11 смонтировано на фланце 12 криостата. Кольцо 13 служит для натяжения вакуум-плотной и гидрофобной пленок.

На рис. 2 представлены результаты выполненных нами измерений ДН облучателя-прототипа [3] на избранных частотах S/X/Ка-диапазонов. На всех рисунках верхние кривые есть ДН облучателя на рабочей круговой поляризации (кополярная диаграмма), а нижние кривые — на ортогональной круговой поляризации (кроссполярная диаграмма). Указаны также допуски на ширину и допустимую «изрезанность» ДН кополярной диаграммы и допустимый уровень кроссполярной даграммы согласно требованиям ТЗ на [3] ДН. Представленные результаты, с одной стороны, иллюстрируют выявленные недостатки облучателя-прототипа, а с другой поясняют суть новых технических решений в апертурном узле КПФБ на рис. 1.

В S-диапазоне наблюдаем уширение ДН на рабочей поляризации (рис. 2, *a*) и зауженную полосу рабочих частот, что обусловлено неудачным выбором конфигурации облучателя-прототипа в S-диапазоне. В облучателе рис. 1 конфигурация S-облучателя коренным образом изменена. Как показали предварительные расчеты (см. далее), для этого облучателя может быть получена требуемая ширина ДН облучателя и расширена полоса рабочих частот. В Ка-диапазоне (рис. 2, б) наблюдаем сильную «изрезанность» ДН на рабочей поляризации и резкие изменения уровня кросс-ДН. Как показало дополнительное исследование, это обусловлено рассеянием излучения Ка-диапазона на металлических элементах крепления вакуумного окна в криостате прототипа. В новом решении введено радиопоглощающее кольцо 11 таким образом, что влияние элементов корпуса криостата на ДН в Ка-диапазоне сведено к минимуму.

В Х-диапазоне наблюдаем «подъемы» и «провалы» уровня рабочей ДН в направлении оси облучателя (рис. 2, *в* и *г*). Как показало дополнительное исследование, это обусловлено ре-



Рис. 2. Кополярная и кроссполярная диаграммы направленности на частотах: *a* — на 2450 МГц, *б* — на 30 ГГц, *в* — на 7000 МГц, *ε* — на 7750 МГц

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4



Рис. 3. Декомпозиция геометрии облучателя и новые базовые элементы

зонансами вследствие отражений излучения от вакуумного окна и обратно от поверхности облучателя. То же явление наблюдалось и в Ка-диапазоне. В облучателе на рис. 1 предложено многослойное вакуумное окно 10 со сниженным уровнем коэффициента отражения. Пенопластовый купол разделен по толщине на две половины, между которыми расположена фторопластовая пленка. Расчеты показали, что для такого окна обратные потери не превышают минус 30 дБ в полосах рабочих частот Х- и Ка-диапазонов. Во всех диапазонах наблюдаем высокий уровень (до -15 дБ вместо желаемого значения -22 дБ) кросс поляризационной ДН. Правда, такой уровень допустим согласно скорректированному техническому заданию на разработку [3].

Предложенная конструкция облучателя принципиально допускает снижение уровня кросс ДН до желаемой величины, что возможно только в результате оптимизации геометрических параметров конструкции S/X/Ka-облучателя в полной конфигурации. Разработанные в рамках данного проекта математическая модель облучателя и быстрые алгоритмы анализа позволят провести синтез S/X/Ka-облучателя с требуемым уровнем кросс ДН.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ S/X/KA-ОБЛУЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ

Для численного моделирования использовался метод обобщенных матриц рассеяния (GSMM generalized scattering matrix method), сводящий задачу анализа объекта сложной структуры (рис. 1) к расчету электромагнитного взаимодействия простых ключевых элементов или их «сборок», отвечающих за фрагменты антенны сложной конфигурации (рис. 3). Такой подход позволяет использовать проблемно-ориентированные численно-аналитические методы расчета, наиболее эффективные для каждого конкретного узла и использовать предварительную крупноблочную оптимизацию. Важно то, что такой подход обеспечивает самую высокую скорость расчетов, открывая принципиально возможными постановки и решения задач многопараметрической оптимизации геометрии антенны «в целом» с учетом характеристик во всех трех диапазонах.

Анализируемый S/X/Ка-облучатель представляется как объект из нескольких крупных составляющих: излучающей круглой апертуры (рис. 3, a) и внутренней секции (рис. 3, δ), в свою очередь состоящей из радиационного экрана и трех антенных облучателей, вложенных друг в друга коаксиально. Для каждого из этих узлов используются свои алгоритмы расчета S-матриц, реализующие наиболее эффективные численные модели.

На первом шаге метод частичных областей (ММТ — mode-matching technique) используется для расчета S-матриц ключевых элементов внутренней геометрии облучателя (рис. 3, δ). На втором — вычисляется S-матрица излучающей «апертуры» (рис. 3, a) на основе разработанного ранее алгоритма, реализующего решение задачи об открытом конце круглого волновода методом Винера — Хопфа. Ввиду особых требований к точному расчету кроссполяризованных компонентов в диаграмме направленности для ее анализа использовался ранее созданный авторами специальный алгоритм (ОСW — opened circular waveguide) предварительного накопления данных и построения суррогатной модели, по ско-



Рис. 4. Численное сравнение результатов моделирования скачка диаметра диэлектрической вставки

рости сравнимой с приближением Кирхгофа, и в то же время реализующий расчет с высокой точностью [11]. На последнем шаге методом обобщенных матриц рассеяния находятся численные данные о рассеянных полях, учитывающих влияние всех эффектов дифракции, как во «внутренней» структуре антенны, так и на собственно «апертуре». Ввиду чрезвычайно широкого диапазона рабочих частот 3-диапазонного облучателя и одновременного возбуждения антенны из нескольких портов, используемый метод расчета позволяет реализовать наиболее эффективный расчет устройства.

Численное моделирование нового облучателя в рамках первого этапа проекта разделено на две самостоятельные задачи, включающие в себя моделирование металлического корпуса и учет влияния новых элементов облучателя Ка-диапазона, содержащих диэлектрик. Если на втором этапе проекта синтез геометрии облучателя будет проведен последовательно в несколько шагов, то на первом этапе реализована соответствующая алгоритмическая база. Это алгоритмы предварительного синтеза «подсборок», отдельных фрагментов облучателей Х- и S-диапазонов:

1) синтез облучателя Х-диапазона, внутренний проводник подводящего волновода которого является внешним для Ка-диапазона; 2) синтез волноводных диафрагм (рис. 3, *г*) коаксиального волновода, используемых для со-гласования в Х-диапазоне;

3) синтез согласующих переходов (рис. 3, *в*) коаксиального волновода, используемых для согласования в Х-диапазоне;

4) синтез геометрии апертуры (рис. 3, *д*) облучателя S-диапазона, внутренний проводник подводящего волновода которого является внешним для X-диапазона;

5) синтез волноводных диафрагм коаксиального волновода, используемых для согласования в S-диапазоне;

6) учет взаимного влияния облучателей на характеристики рассеяния.

Они будут использованы при пошаговом синтезе объединенного S/X/Ка-облучателя именно в представленной последовательности. Заключительные шаги синтеза трехдиапазонного облучателя состоят в учете характеристик излучения из внутреннего круглого волновода Ка-диапазона с диэлектрической вставкой на его конце. С целью расширения возможностей MWD II на случай волноводов с частичным диэлектрическим заполнением на первом этапе проекта решены такие задачи:

1) аналитическая формулировка алгоритмов расчета волноводных базисов и S-матриц плос-ко-поперечных соединений,

2) программная реализация и отладка,

3) подключение новых ключевых элементов в библиотеку базовых алгоритмов MWD II.

В рамках первого этапа проекта были реализованы: алгоритм расчета базисов круглого волновода с диэлектрическим включением; алгоритм расчета соединения круглого волновода с диэлектрическими вставками различных радиусов (рис. 3, *e*) и алгоритмы расчета перехода с круглого волновода с диэлектрическим включением на коаксиальный волновод и на круглый волновод с диэлектрической вставкой другого размера (рис. 3, *ж*). Оценка достоверности проведена путем сравнения с расчетом на коммерческом пакете CST.

Для примера на рис. 4 показаны модуль коэффициент отражения (рис. 4, a) и его фаза (рис. 4, δ) для скачка диаметра диэлектрической вставки в круглом волноводе. Видно хорошее совпадение результатов трудоемких расчетов CST Studio, с нашими результатами, потребовавшими доли секунды.

выводы

На основе анализа спецификаций параметров радиотелескопов VLBI2010-сети и основываясь на опыте разработки КПФБ для телескопов российской РСДБ нового поколения, определены технические параметры к разработке нового охлаждаемого S/X/Ка-облучателя для VLBI2010совместимой зеркальной антенны фирмы "Vertex Antennentechnic GmbH".

На основе проведенного в рамках данного проекта экспериментального исследования причин ухудшения характеристик диаграмм направленности и коэффициента эллиптичности S/X/Ka-облучателя радиотелескопов РСДБ [3] предложено новое техническое решение апертурного узла КПФБ, в котором выявленные недостатки устранимы.

Разработаны алгоритмы, обеспечивающие анализ характеристик S/X/Ka-облучателя с учетом диэлектрических компонентов в составе конструкции. Алгоритмы введены в систему электродинамического моделирования MWD II, ранее разработанную в ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины при участии авторов данного проекта.

Созданные алгоритмы позволяют на втором этапе проекта осуществить синтез и оптимиза-

цию всей конструкции облучателя с использованием современных оптимизационных алгоритмов, поскольку время расчета характеристик всего облучателя на фиксированной частоте составляет лишь доли секунды в S-диапазоне и несколько секунд в Ka-диапазоне.

- Гламаздин В. В., Евсимгнеев А. А., Зотов М. Б. и др. Предложения по модернизации приёмных устройств радиотелескопов РТ-70 с целью обеспечения их совместимости с РСДБ-комплексом «Квазар-КВО» // Тез. докл. Всерос. радиоастрон. конф. (ВРК – 2014). — Пущино, Россия, 2014. — С. 83—84.
- 2. *Ипатов А. В.* Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физ. наук. 2013. **183**, № 7. С. 769—777.
- 3. Ипатов А. В., Чмиль В. М., Скресанов В. Н. и др. Криогенный приемный фокальный блок для телескопов радио интерферометрического комплекса нового поколения // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — **19**. — С. 81—96.
- 4. Приколотин С. А., Кириленко А. А. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 1. Спектры собственных волн ортогонных волноводов // Радиофизика и электроника. 2010. 15, № 1. С. 17—29.
- 5. Стешенко С. А., Приколотин С. А., Кириленко А. А. и др. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 2. Плоско-поперечные соединения и «in-line» объекты // Радиофизика и электроника. — 2013. — 18, № 4. — С. 3—12.
- 6. *Hase H., Behrend D., Ma C.* The future global VLBI2010 network of the IVS // Earth rotation, reference systems, and celestial mechanics: synergies of geodesy and astronomy / Eds H. Schuh, S. Böhm, T. Nilsson, N. Capitaine. Vienna, 2012. P. 243–248. (Journées 2011 "Systèmes de référence spatio-temporels", Vienna, Austria, 2011).
- 7. *Hase H., Dassing R., Klugel T., et al.* Twin Telescope Wettzell (TTW) A VLBI2010 project. Presentation at the IVS VLBI 2010 Workshop on Future Radio Frequencies and Feeds, http://www.fs.wettzell.de/veranstaltungen/vlbi/frff2009/Part8/ttwvlbi2010e.pdf, 2009 (Download 2011-05-29).
- 8. *José Antonio López-Fernández*. The RAEGE VLBI radio telescope // IVS VLBI2010 Workshop on TecSpec. Bad Kötzting, Germany, 2012. doi:10.1117/12.926535.
- Niell A., Whitney A., Petrachenko B., et al. VLBI2010 a vision for geodetic VLBI, current and future requirements for geodetic VLBI systems". — IVS Document: http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/wg/wg3/IVS WG3 report 050916.pdf.
- 10. *Perov A. O., Glamazdin V. V., Skresanov V. N.* Design and optimization of tri-band coaxial feed horn for the radio telescope antenna // Proceedings of the 9th Int. conf.

on antenna theory and techniques (ICATT). – Odessa, Ukraine, 2013. – P. 441–443.

- Perov A. O., Tkachenko V. I., Kirilenko A. A. Comparative analysis of open-ended waveguide characteristics, obtained by exact and aperture models // Telecommunications and Radio Engineering. – 2006. – 65, N 17. – P. 1571–1583.
- Skresanov V. N., Glamazdin V. V., Kirilenko A. A., et al. Circular polarization splitters for three-band feed of radiotelescope reflector antenna // Proceedings of the 9th Int. conf. on antenna theory and techniques (ICATT). – Odessa, Ukraine, 2013. – P. 43–48.

Стаття надійшла до редакції 24.12.14

- А. О. Кириленко, А. О. Перов,
- В. М. Скресанов, С. О. Стешенко,
- В. В. Гламаздін, М. П. Натаров, О. І. Шубний

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків

БАГАТОЧАСТОТНИЙ ОПРОМІНЮВАЧ ДЗЕРКАЛЬНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ КРІОГЕННИХ ПРИЙМАЛЬНИХ ФОКАЛЬНИХ БЛОКІВ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ VLBI2010-МЕРЕЖІ НОВОГО ПОКОЛІННЯ: СИНТЕЗ, ПРОЕКТУВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТ

Запропоновано нову конфігурацію і розроблено строгу електродинамічну модель тридіапазонного S/X/Каопромінювача для дзеркальної антени VLBI2010 сполучених радіотелескопів. Результати отримано у відповідності до календарного плану першого етапу договору № 8/14 від 05.03.14, що виконується ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України згідно з розпорядженням Президії НАН України № 140 від 04.03.14.

Ключові слова: РНДБ, радіотелескоп, дзеркальна антена, охолоджуваний S/X/Ka-опромінювач, діаграма спрямованості, колова поляризація, система електродинамічного моделювання.

A. A. Kirilenko, A. O. Perov, V. N. Skresanov,

S. A. Steshenko, V. V. Glamazdin, M. P. Natarov, A. I. Shubny

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

MULTIFREQUENCY FEED OF REFLECTOR ANTENNA FOR THE RADIOTELESCOPE CRYOGENIC RECEIVER FOCAL BLOCK FOR THE NEW GENERATION VLBI2010 NETWORK: SYNTHESIS, DESIGN, EXPERIMENT

The new configuration of three-band S/X/Ka feed of a radio telescope reflector antenna for VLBI2010-compatible radio telescopes is proposed. We discuss its parameters as well as the developed rigorous electrodynamic model.

Key words: VLBI, radiotelescope, reflector antenna, cooled S/X/Ka feed, pattern, circular polarization, electrodynamic simulation system.

Л. М. Лобанов, В. С. Волков

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

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАНОГО ОБ'ЄМУ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Обґрунтовано оптимальний тип базової поверхні конструкції перетворюваного об'єму (КПО) та створено математичну модель її перетворення до компактної форми. Визначено оптимальні геометричні параметри КПО конічного типу. Виконано моделювання характеру розподілу напружень в оболонці конструкції на послідовних стадіях перетворення та дослідження кінетики процесу розкриття тонкостінних конічних КПО. Визначено критерії якості нероз'ємних з'єднань перетворюваних тонкостінних металевих оболонок, створено технологічне обладнання для їхнього виготовлення та лабораторні зразки для випробовувань.

Ключові слова: конструкції перетворюваного об'єму, несні оболонки, розгортні космічні конструкції.

ВСТУП

Сучасний стан розвитку перетворюваних оболонкових конструкцій у світовій космічній техніці характеризується пошуком рішень, здатних забезпечити достатню жорсткість трансформованих оболонок у робочому стані та надати їм несучі властивості, уникнувши додаткових витрат енергії в умовах космічного простору [4]. Актуальність досліджень обумовлена необхідністю створення конструкцій перетворюваного об'єму (КПО) із жорсткою металевою оболонкою, здатних до перетворень у компактний стан без локальної втрати стійкості матеріалу поверхні та зворотної трансформації і подальшої довготривалої експозиції в умовах дії факторів космічного простору (ФКП). При виконанні роботи була поставлена задача пошуку типу несучої КПО, оптимальної для використання у космічній техніці, створення розрахункової моделі, що дозволяє визначати геометричні та технологічні параметри широкого спектру КПО стосовно до умов експлуатації у відкритому космосі, а також створення та дослідження лабораторних зразків оболонок згідно отриманих розрахункових залежностей.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІЗОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ КПО КОНІЧНОГО ТИПУ

Теоретична модель оборотної формозміни КПО припускає об'ємні деформації тонких оболонок, які відбуваються при практичній відсутності розтягування або стиснення матеріалу, тобто близькі до ізометричних перетворень. Найбільш перспективними з точки зору надійності, ефективності використання робочого простору і простоти виготовлення є конструкції на основі лінійчатих поверхонь нульової гауссової кривизни, які можуть бути «розгорнуті у площину» шляхом перетворень, досить близьких до ізометричних. Розроблені в IEЗ технології дозволяють здійснювати подібне перетворення конструкцій з реальних матеріалів (листового металу), заміщаючи бічну поверхню конуса локально ізоме-

[©] Л. М. ЛОБАНОВ, В. С. ВОЛКОВ, 2015

тричною поверхнею, що утворюється кільцевими складками [3].

Розроблений у ході виконання роботи процес створення КПО конічного типу підпорядкований простому алгоритму, перший крок якого включає власне проектування конструкції і її міцнісний розрахунок, що враховує реальні умови експлуатації. Далі моделюється ізометричне перетворення одиничного елемента (кільцевого гофра) нейтральної поверхні оболонки, при якому рух обраного сегмента може бути описано одним рівнянням деформації [1], що допускає обробку чисельними методами. Зображення нейтральної поверхні оболонки у тривимірному просторі може бути отримане, зокрема, обертанням графіка функції $f = (x - a)^3$. Із використанням параметра t ($0 \le t \le 1 + \varepsilon$, де $\varepsilon \ge 0$) деформацію функції f можна подати послідовністю відображень, наведених на рис. 1. При t = 0 відповідна поверхня обертання $\check{Z}_1 \epsilon$ прямим круговим конусом (рис. 1, *a*), твірна якого при зростанні *t* $(0 \le t \le 1)$, послідовно вигинається відповідно до деформації твірної металевої конічної оболонки у процесі технологічного перетворення (рис. 1, б). При t = 1 поверхня Z є поверхнею, що отримана обертанням кубічної параболи $y = (x - a)^3$ навколо осі Oy (рис. 1, *в*). Відповідно при $t = 1 + \varepsilon$ (ε >0) поверхня обертання Ž, задається як графік функції, графічне зображення якої наведене на (рис. 1, г). Побудова графічних зображень виконувалася за допомогою системи Wolfram Mathematica®.

Отримана математична модель враховує особливості ізометричного перетворення поверхонь обертання, дозволяє визначити основні геометричні параметри нейтральної поверхні у будьякий момент її перетворення (руху) і є основою для побудови динамічної скінченно-елементної моделі елементів перетворюваної конструкції (рис. 2, 3), що враховують властивості реального матеріалу оболонки.

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК Конструкції перетворюваного об'єму

Оптимальні геометричні характеристики КПО було визначено шляхом пошуку найбільш вигідного співвідношення стійкості оболонки та її компактності, або коефіцієнта трансформації $K_{\rm T}$ при мінімально можливій масі. Так, в конічних КПО зменшення кута конусності (α) і наближення секцій конструкції до конфігурації циліндра, найбільш вигідної з точки зору стійкості до впливу невісесиметричних навантажень, призводить до зниження коефіцієнта трансформації $K_{\rm T}$. Протилежний підхід істотно знижує просторову жорсткість конструкції, але дозволяє підвищити $K_{\rm T}$ і спростити процес компактного складання.

Розрахунок напружено-деформованого стану та стійкості конструкції проводився з використанням методу скінченних елементів (МСЕ), реалізованого за допомогою універсальних програмних систем скінченно-елементного аналізу. Результати розрахунку максимальних відхилень вільного кінця проектованої довгомірної КПО з 31 конічної секції та ізополів еквівалентних напружень при впливі на неї комбінації лінійних ($a_x = +12 \text{ м/c}^2$, $a_y = +12 \text{ м/c}^2$, $a_z = +9 \text{ м/c}^2$) та кутових ($\varepsilon_x = +1.4 \text{ рад/c}^2$, $\varepsilon_y = +1.4 \text{ рад/c}^2$, $\varepsilon_z = +0.4 \text{ рад/c}^2$) прискорень її центра мас у напрямку та навколо осей *ОХ*, *ОУ*, *ОZ* дозволяють зробити висновок про оптимальність кута ко-



Рис. 1. Неперервні відображення нейтральної поверхні конічної оболонки, відповідні до стадій об'ємного деформування одиничної кільцевої складки

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4



а

наближеного до ізометричного (б)

нусності елементів конструкції, що дорівнює $\alpha = 25^{\circ}$. У даному випадку максимальні значення еквівалентних напружень у матеріалі оболонки дорівнюють $\sigma_{ekb \text{ макс}} = 161 \text{ М} \Pi a \, i \, \varepsilon$ значно меншими від значень межі плинності для досліджуваного матеріалу (аустенітна сталь, $\sigma_{0,2} = 266 \text{ M}\Pi a$), отриманих експериментальним шляхом. Величини та орієнтація розрахункових прискорень відповідають вимогам до створення та обслуговування наукової апаратури, що розміщується на зовнішній поверхні МКС. Очевидно, що просторова жорсткість КПО даного типу при незмінному куті конусності її секцій може бути істотно збільшена шляхом використання конструкційних матеріалів більшої товщини або зміною висоти і кількості) самих секцій. І у першому, і у другому випадку компактність конструкції знижується, а її відносна маса збільшується, що не відповідає базовій концепції створення багатосекційної КПО конічного типу.

б

При дослідженнях процесу формоутворення кінцевих перетворюваних поверхонь оболонкової КПО проведено визначення траєкторії руху фіксованих точок поверхні і відповідних контактних ділянок формувального інструменту (рис. 2, а) та побудовано динамічну скінченно-елементну модель утворення послідовних складок (гофрів) перетворюваної конструкції з урахуванням властивостей реального матеріалу оболонки (рис. 2, б). Мета дослідження полягала у знаходженні оптимальної схеми переміщення формувального інструменту (ротаційного

пуансона), яка дозволяє реалізувати процес об'ємного деформування вихідної конічної оболонки із максимальним наближенням до схеми ізометричного перетворення. Критерієм наближення обрано мінімізацію залишкових напружень та переміщень в конічних оболонках після завершення процесу деформування. Одночасно було проведено оцінювання впливу пружнопластичних властивостей конструкційних матеріалів КПО на характер формоутворення кінцевих структурних елементів конструкції (рис. 3, а) та проведено аналіз ізополів напружень та переміщень конічної оболонки, перетворюваної у плаский диск, у процесі формоутворення (рис. 3, б). Результати дослідження дозволили скоригувати вихідну геометричну модель, отриману шляхом моделювання ізометричного перетворення нейтральної поверхні оболонки, а також провести прогнозування локальної втрати стійкості оболонки КПО. Задача вирішувалась з урахуванням фізичної нелінійності поведінки матеріалу. Використані для визначення розрахункових даних діаграми розтягнення (деформації) досліджуваного матеріалу були отримані експериментальним шляхом за допомогою випробувальної системи МТЅ® 318.25.

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ ТА СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ТОНКОСТІННИХ ПЕРЕТВОРЮВАНИХ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК

Однією з основних проблем при створенні оболонок КПО є досягнення поєднання високих фізико-механічних характеристик при одночасній вакуум-щільності зварних швів, які піддаються комплексу впливів механічних навантажень і специфічних агресивних зовнішніх факторів. Метою проведених досліджень було визначення оптимальних умов формування нероз'ємних з'єднань тонких перетворюваних сталевих оболонок КПО, здатних забезпечити службові характеристики конструкції в екстремальних умовах експлуатації.

Схема ізометричного перетворення оболонки, описувана сімейством неперервних відображень її нейтральної поверхні (рис. 1), потребує ізотропності конструкційного матеріалу остан-



Рис. 4. Мікроплазмове зварювання тонкостінного елементу 1 (секції) конструкції перетворюваного об'єму на складально-зварювальному пристосуванні 2

ньої; отже, зварний шов повинен мати практично еквівалентні з основним металом конструкції фізико-механічні властивості. Таким чином, головна технологічна задача полягає у створенні якісного вакуум-щільного зварного з'єднання із заданими характеристиками пластичності і міцності.

При створенні КПО космічного призначення з метою зниження маси використовуються мінімальні товщини конструкційних матеріалів оболонки, при яких може бути забезпечена необхідна міцність конструкції без втрати її функціональних властивостей. При виборі способу зварювання стикових з'єднань з нержавіючої сталі з товщиною $\delta = 0.1...0.175$ мм перевагу було віддано мікроплазмовому зварюванню [2]. Цей метод дозволив значно спростити підготовку торців розгортки конічної заготовки під зварювання, збільшивши тим самим продуктивність виготовлення КПО, і зменшити теплові деформації зварного шва при використанні попереднього відбортування зварюваних крайок. При зварюванні заготівок з нержавіючої сталі було застосовано відбортування крайок на величину, рівну двом товщинам матеріалу. Крім того, мікроплазмове зварювання дозволило забезпечити



Рис. 5. Модель конічної конструкції перетворюваного об'єму з трьох гофрованих дисків (*a*) та лабораторний зразок даної КПО у розкритому стані (*б*): *J* — модель сегментів конструкції із внутрішнім та зовнішнім кільцевими зварними з'єднаннями, *i* — замикальний елемент

практично повну відтворюваність зафіксованого результату, що можна пояснити менш жорсткими, порівняно з лазерним зварюванням, вимогами до точності механізму переміщення джерела нагрівання.

Визначення оптимальних параметрів зварювального процесу та подальше виготовлення тонкостінних елементів 1 (секцій) КПО (рис. 4) виконувалося на спеціально спроектованому складально-зварювальному пристосуванні 2, що забезпечує жорстку фіксацію кромок конічних заготовок з фольги на довжині в кілька десятків сантиметрів за відсутності зварювальних депланацій, ефективне відведення тепла від зони шва і максимальну простоту складальної операції. Захист кореня шва з його одночасним примусовоконвективним охолодженням досягався нагнітанням інертного газу через серію послідовних отворів змінного перерізу в захисному каналі, сполученим з колектором. Глибина, перетин і конфігурація отворів, а також чистота обробки їхніх кромок дозволяють досягти на всій протяжності кореня шва практично ламінарного витікання з повним розкриттям струменів і з рівними швидкостями потоку для захисних газів різної щільності при їхній витраті в діапазоні 5...10 дм³/хв. При заданому значенні струму I і коефіцієнта заповнення (duty cycle) D, коректування погонної енергії Q₁ на різних частотах f імпульсного струму забезпечувалося зміною

об'ємних витрат плазмоутворюючого і захисного газів при їхньому незмінному оптимальному співвідношенні, отриманому для обраних параметрів плазмотрона емпіричним шляхом і рівному 0.32 при використанні аргону. Обмеження частоти імпульсного струму значенням f = 200 Гц пов'язано з необхідністю пошуку оптимальних критеріїв якості з'єднань в діапазоні параметрів джерела, що не викликають швидкого зносу електрода і камери плазмоутворення плазмотрона і, як наслідок, порушення стаціонарного режиму зварювання.

Первинна якість отриманих з'єднань підтверджувалася капілярним і вихрострумовим методами неруйнівного контролю; після вибіркового випробування з'єднань на багаторазовий вигин і статичний розтяг, проводився аналіз їхньої структурної неоднорідності, хімічної неоднорідності методом мікрорентгеноспектрального аналізу, а також мікротвердості металу зварного шва, зони сплавлення і основного металу оболонки. У всіх випадках критерієм якості була практична еквівалентність відхилень досліджуваних характеристик в конструкційному матеріалі, нероз'ємному з'єднанні, а також у їхніх перехідних зонах. На заключній стадії визначення якості зварних з'єднань проводилися дослідження їхньої тонкої структури, основані на уявленні про визначальний вплив структурно-фазового стану металу на його фізико-механічні властивості.


Рис. 6. Результати моделювання ізополів напружень в оболонці конструкції, аналогічній зображеній на рис. 5, *б*, у процесі розкриття

Результати роботи дозволяють зробити висновок про можливість поєднання критеріїв якості розглянутих нероз'ємних з'єднань у діапазоні параметрів зварювального процесу, відповідних до частот імпульсного струму зварювання $f_{\rm PC} = 100 \dots 200$ Гц.

Після підтвердження якості зварних з'єднань тонкостінним елементам (секціям) КПО шляхом ізометричного перетворення аналогічно моделі, наведеній на рис. З надається форма плаского гофрованого диску. Відповідно, вакуум-щільні з'єднання дисків по контурах більшої та меншої основ дозволяють отримати довгомірну перетворювану конструкцію із заданими розрахунковими параметрами. Рішення задачі стійкості багатосекційної КПО космічного призначення і розрахункова оцінка її деформативності дозволили визначити вимоги до конфігурації і жорсткості зварних з'єднувальних елементів конічних секцій, особливо елементів меншого діаметра, що піддані найбільшим питомим навантаженням. Функціональне призначення кільцевих зварних з'єднань не обмежується підтримкою цілісності, механічної міцності і вакуум-щільності багатосекційної довгомірної конструкції; необхідні демпфуючі властивості останньої можуть бути забезпечені особливостями профілю конічних поверхонь КПО в поєднанні з жорсткістю кільцевих з'єднувальних елементів. Зварювання конічних секцій по периметрах основ об'єднує їхні суміжні фланцеві відбортування в єдиний елемент жорсткості — кільцевий шпангоут, ефективність якого залежить більшою мірою від ширини кільця, а не від його сумарної товщини, а також від характеру зварного з'єднання.

Зокрема, в розглянутій КПО при зварюванні відбортувань меншого діаметру з розрахунковою шириною 6 мм необхідний результат може бути досягнутий застосуванням комбінованого шва прорізного з фіксацією осі плазмотрона по нормалі до площини фланця, а потім торцевого, при орієнтації осі плазмотрона по лінії радіуса плаского гофрованого диску. Схема об'єднання відбортувань у шпангоути в лабораторному зразку, що складається з трьох гофрованих дисків, показана на рис. 5. Наведені моделі сегментів ілюструють схему виконання зварних з'єднань, що дозволяє зв'язати периметри конічних секцій в жорсткий кільцевий елемент конструкції. Вакуум-щільні з'єднання торцевої конічної секції з замикальним елементом (денцем) (рис. 5, *i*), що має товщину матеріалу $\Delta = 6...8 \delta$, де δ — товщина матеріалу оболонки конструкції, реалізуються попереднім зварюванням периметру секції з кільцем проміжної товщини $\delta_1 = (\Delta + \delta)/2$.

Кільцеві зварні з'єднання конічної КПО, на відміну від прямолінійних швів конструкції, не зазнають значних технологічних і експлуатаційних деформацій і мають незначні навантаження від внутрішнього надлишкового тиску розкриття, що не перевищує величини 50 кПа. З'єднання можуть бути виконані мікроплазмовим методом в імпульсному режимі за умови коригування схеми подачі захисного газу для торцевих швів.

Для оцінки функціональних якостей КПО і коригування розрахункової конфігурації шпангоутів було проведено динамічне моделювання ізополів напружень у оболонці конструкції у процесі розкриття (рис. 6). Поданий на рис. 6 результат моделювання ілюструє зріст напружень (*a*, б) у оболонці КПО до стадії, що передує стану повного розкриття (рис. 6, *в*); максимальні величини еквівалентних напружень ($S_{ekB} = 328$ МПа) досягаються на ділянках сполучення конічних секцій конструкції (шпангоутах). За умови повного розкриття КПО (рис. 6, *г*) відмічено перерозподіл напружень та зниження їхнього рівня до значень $S_{ekB.max} = 42$ МПа. Післе зняття навантаження від внутрішнього тиску розкриття величини напружень не перевищують значень $S_{ekB.max} = 16$ МПа.

Початкові експерименти зі зварювання зразків сталевих фольг марки 12Х18Н10Т дозволяють зробити висновок про технологічну можливість створення вакуум-щільних тонких перетворюваних оболонок, відповідних до умов поєднання обраних критеріїв якості, із практичною відсутністю дефектів, та можливість подальшого переходу до етапу виготовлення дослідних та натурних зразків багатосекційної КПО.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено залежності параметрів перетворення та створено математичну модель процесу трансформації довгомірної оболонкової конструкції космічного призначення. Виконане динамічне моделювання розподілу напружень в оболонці конструкції в процесі перетворення до компактного стану, яке дозволяє прогнозувати локальну втрату стійкості оболонки КПО у стані розкриття. Отримані лабораторні зразки нероз'ємних з'єднань на аустенітних сталях фольгового класу та визначені оптимальні співвідношення параметрів дискретного вводу зварювального тепла, здатні забезпечити практичну еквівалентність відхилень характеристик якості, пластичності та міцності в конструкційному матеріалі, нероз'ємному з'єднанні, а також у їхніх перехідних зонах.

Роботу виконано в рамках Цільової програми НАН України з космічних досліджень.

- 1. Волков В. Про ізометрії поверхонь обертання // Вісник КНУ ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Математика. Механіка. — 2013. — № 29. — С. 36—39.
- 2. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. и др. Микроплазменная сварка. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.

- Paton B. E., Lobanov L. M., Volkov V. S. Transformable structures (Review) // The Paton Welding J. – 2011. – 12. – P. 25–33.
- Schenk M., Viquerat A. D., et. al. Review of Inflatable Booms for Deployable Space Structures: Packing and Rigidization // J. Spacecraft and Rockets. – 2014. – 51, N 3. – DOI: 10.2514 /1.A32598. – http://wwwg.eng. cam.ac.uk/advancedstructures/files/pdf/2014JSR.pdf

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Л. М. Лобанов, В. С. Волков

Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины, Киев

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Обоснован оптимальный тип базовой поверхности КПО и создана математическая модель ее преобразования к компактной форме. Определены оптимальные геометрические параметры КПО конического типа. Выполнено моделирование характера распределения напряжений в оболочке конструкции на последовательных стадиях преобразования и исследование кинетики процесса раскрытия тонкостенных конических КПО. Определены критерии качества неразъемных соединений преобразуемых тонкостенных металлических оболочек, создано технологическое оборудование для их изготовления и лабораторные образцы для испытаний.

Ключевые слова: конструкции преобразуемого объема, несущие оболочки, развёртываемые космические конструкции.

L. M. Lobanov, V. S. Volkov

E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF TRANSFORMABLE-VOLUME STRUCTURES FOR SPACE APPLICATIONS

We present a grounded optimal type of transformable-volume structures' (TVS) basic surface and the developed mathematical model of its transformation into a compact form. Optimal geometric parameters of a conical type TVS were determined. The parameters of stresses distribution in a structure's shell at successive stages of transformation was modeled and kinetics of a thinwalled conical TSV unfolding process was studied. Quality criteria of permanent joints of the transformable thin-walled metal shells were determined and the technological equipment for their manufacture and laboratory tests samples was designed.

Key words: transformable-volume structures, load-carrying shells, deployable space structures.

УДК 539.1

В. О. Стрижало, Ю. Д. Скрипник

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка Національної академії наук України, Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ВТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Описано дві експериментальні установки для дослідження циклічної втоми конструкційних матеріалів в лабораторних умовах. Конструкція першої імітує орбітальну установку і реалізує відповідну методику випробувань в космічних умовах. Для спрощення експериментальних засобів ця методика передбачає випробування лише в жорсткому режимі — при заданій в циклі амплітуді загальної (пружної і пластичної) деформації. Друга установка призначена для всебічного дослідження циклічних властивостей матеріалів з отриманням циклічних діаграм деформування і даних про вплив доступних видів зовнішнього середовища.

Ключові слова: експериментальна установка, циклічна втома, космічні умови, зразок, конструкційний матеріал, діаграма деформування.

Дана робота є розвитком початої раніше роботи із створення методик і комплексу устаткування для механічних випробувань конструкційних матеріалів в умовах навколоземного космічного простору, широкий спектр факторів котрого неможливо відтворити в земних лабораторіях. Дійсно, конструкційні матеріали космічних апаратів під час довгострокової служби зазнають пошкоджувальної дії низки факторів космічного простору (ФКП), таких як вакуум, змінні температури, сонячний вітер, сонячне випромінювання, галактичне космічне випромінювання, випромінювання радіаційного космічного поясу Землі, метеори та космічний пил тощо. Такі пошкодження набувають небезпечного характеру і призводять до зниження надійності конструкції або її руйнування. На додаток, експериментами на орбітальних станціях встановлено помітний вплив орієнтації зразків матеріалів: при направленні їхньої поверхні в напрямку земної поверхні, від неї або в напрямку польоту космічного апарата.

На запитання, як діє космос на матеріали, широко відома відповідь: варіантів стільки, скільки існує матеріалів. Тому експерименти на орбіті є пріоритетними, а особливо активні, в яких дані отримуються під час перебування зразків в космічних умовах.

Для першочергової реалізації обрано [1] випробування на циклічну втому у пружно-пластичній області, тобто на малоциклову втому як найбільш чутливу до слабких і довготривалих впливів навколишнього середовища. Зразки металевих конструкційних матеріалів виконано плоскими у вигляді балок рівного спротиву згину, в яких напруження розтягу і стиску під час навантаження однакові по всій поверхні. Циклічне навантаження відбувається в жорсткому режимі із заданою для кожного зразка величиною переміщення незакріпленого кінця зразка. Реєструється кількість циклів до руйнування, ознакою якого є відсутність спротиву зразка деформуванню, що фіксується спеціальним давачем. За даними випробувань певної кількості зразків оцінюється циклічна довговічність ма-

[©] В. О. СТРИЖАЛО, Ю. Д. СКРИПНИК, 2015



Рис. 1. Навантажувальний пристрій: *а* — зразок для випробувань, *б* — вузол навантаження, *в* — загальний вид (*1* — ролик, *2* — шарнір Гука, *3* — шайба, *4* — ролик, *5* — навантажувальний механізм, *6* — електромеханічний привід, *7* — стійка, *8* — повзун, *9* — касета, *10* — зразок)

теріалу і вплив факторів навколишнього середовища.

Така спрощена методика випробувань була обрана через складні умови проведення експериментів на борту космічних апаратів. Для більш обґрунтованої постановки імітаційних і космічних експериментів необхідне попереднє всебічне дослідження циклічних властивостей матеріалів на зразках обраного типу. Відмінність цієї методики від викладеної вище полягає в тому, що у процесі експерименту не тільки задається амплітуда переміщення вільного кінця зразка (консолі), але і фіксуються проміжні переміщення і відповідні їм зусилля завдяки встановленим давачам переміщень і сили, сигнали з яких надходять в електронну систему вимірювань і керування. Тобто отримуються циклічні діаграми деформування, які дозволяють спостерігати за перебігом навантаження, появою ознак руйнування і його подальшого розвитку, оцінюють величини пружних і пластичних деформацій в циклі, аналізують відмінності діаграм для різних умов експерименту. Електронна система вимірювань і керування дозволяє реалізувати не тільки жорсткий режим, як в описаній вище методиці, але і м'який з фіксацією у певних межах односторонньо накопиченої деформації, а також задавати різноманітні режими навантаження, включаючи витримки часу між циклами, імітуючи аналогічні режими в космічних умовах.

Створено навантажувальний пристрій (рис. 1) для відпрацювання в лабораторних умовах конструктивних рішень орбітальної установки, на якій реалізовано описану вище спрощену методику випробувань на циклічний згин в жорсткому режимі навантаження. Пристрій складається з касети 9 із зразками 10, електромеханічного приводу 6 і двох механізмів 5 передачі зусилля на зразки. В касеті розміщується 24 зразки, що дозволяє одночасно випробувати кілька матеріалів в різних режимах. Кожен зразок вільним, незакріпленим кінцем взаємодіє з відповідним повзуном \mathscr{S} . Товщина зразка і довжина проточки повзуна визначають деформацію зразка в циклі, як це описано вище. Касету змонтовано на вертикальному приводному валу, який обертається у підшипниках у стійці 7, на якій нерухомо закріплені навантажувальні механізми 5, ролики 4 котрих через шайби 3, змонтованих на шарнірах Гука 2, передають зусилля на повзуни \mathscr{S} і далі на зразки 10. Кутова швидкість касети складає 2 об/хв, тобто частота навантаження кожного зразка дорівнює 2 цикл/хв.

Перед випробуваннями для кожного зразка в касеті необхідно визначити параметри циклу його деформування при переміщенні сполученого з ним повзуна від одного крайнього положення до другого. Як уже зазначалось, переміщення зразка в точці прикладання сили залежить від товщини зразка і величини проточки повзуна. За допомогою тарувального пристрою (рис. 2) за повний цикл переміщення повзуна отримуємо діаграму в координатах «переміщення — сила», що включає ділянки з навантаженням зразка і ділянки, що відповідають переміщенню повзуна без контакту із зразком (рис. 3, *a*). Після вилучення ділянок без навантаження діаграма набуває звичного вигляду (рис. 3, *б*).

Тарувальний пристрій (рис. 2) складається з корпусних деталей 10 і 11, на яких монтуються функціональні вузли пристрою. Важіль 5, змонтований в корпусі 11 на підшипниках, має з боку зразків вилкоподібну конструкцію з кульовими опорами 15, що контактують з обох боків з відповідним повзуном 13, переміщуючи його в процесі навантаження. З важелем з'єднано пружний елемент 4, який передає зусилля від гвинтового механізму 9 при ручному обертанні шківу 8 і відповідного переміщення гвинта б. У межах зазорів між зразком і повзуном, а також між повзуном і кульовими опорами важеля, переміщення важеля відбувається без зусилля (окрім невеликого тертя в шарнірах). Це відповідає горизонтальним відрізкам на первинній діаграмі. Коли переміщення вимагає долання опору зразка, відбу-



Рис. 2. Тарувальний пристрій (1 — індикатор, 2 — притискний гвинт, 3 — кронштейн, 4 — пружний елемент, 5 — важіль, 6 — гвинт, 7 — індикатор, 8 — шків, 9 — гвинтовий механізм, 10, 11 — корпусні деталі, 12 — зразок, 13 — повзун, 14 — касета, 15 — кульова опора)



Рис. 3. Діаграми деформування: первинна (*a*) і оброблена (б) (P — сила, P_a — амплітуда сили на зразку, W — переміщення, W_a — амплітуда переміщення точки прикладання сили, W_{nn} — залишкове переміщення після розвантаження)

вається деформування пружного елемента 4, що фіксує індикатор 7, прокалібрований в одиницях сили. Лінійні переміщення повзуна і зразка фіксує індикатор 1, нерухомо закріплений в кронштейні 3. Тарувальний пристрій закріпляється



Рис. 4. Прилад для випробувань на циклічну втому: a — аксонометрія, δ — фронтальний вид (1 — зразки, 2 — каркас, 3 — наконечник, 4 — коромисло, 5 — вісь, δ — пружний елемент, 7 — траверса, 8 — шатун, 9 — ексцентрик, 10 — привод, 11 і 12 — упори, 13 — давачі деформації, 14 — давач сили)

на касеті 14 проти обраного зразка за допомогою притискних гвинтів 2. Є можливість використовувати замість індикаторів давачі переміщень і реєструвати відповідні діаграми деформування на комп'ютері.

Для всебічного дослідження в лабораторних умовах циклічних властивостей матеріалів на зразках обраного типу розроблений спеціальний прилад (рис. 4). Зразки *1* (їх п'ять) нерухомо закріплені на каркасі *2*. Вільні кінці зразків із визначеним зазором входять в пази наконечників *3*, які є змінними елементами навантажувальних коромисел *4* (їх також п'ять). Коромисла в середній частині шарнірно змонтовані на нерухомій осі *5*. До коромисла приєднано пружний елемент 6, який взаємодіє з двома нижніми траверсами 7 шатуна 8. Дві верхні траверси шатуна взаємодіють з ексцентриком 9, який обертається від приводу 10 і приводить шатун в коливальний рух навколо осі 5. Ці коливання через траверси і пружний елемент 6 передаються коромислам і далі на зразки. Радіус ексцентрика в межах одного експерименту є сталим, тому також сталою є амплітуда коливань шатуна і контактних точок пружних елементів коромисел. Режими навантаження і деформування для кожного зразка налаштовуються індивідуально підбором наконечників 3 з відповідним пазом, а також установкою упорів 11 і 12. Контроль за налаштуванням режимів здійснюється за показами давачів деформації зразків 13 і давачів прикладеної до зразків сили 14. Розроблені давачі належать до типу соленоїдних індуктивних. Після налаштування режимів у процесі експерименту сигнали давачів реєструються в електронній системі вимірювання і керування з використанням комп'ютера.

Спеціальний штатив (не показано) дозволяє встановлювати прилад у положення, зручні для конкретних умов випробувань. Так, положення з орієнтацією зразків вниз можна використати для випробувань у посудинах, наприклад, із зрідженим азотом або електролітом. Орієнтація зразками вгору — у нагрівальних пристроях, під кутом 45° — при випробуваннях із зануренням в агресивне середовище і одночасним спостереженням через мікроскоп, приєднаним до комп'ютера. Горизонтальне положення на штативі може бути використане для тарувальних процедур.

Робота виконувалась в рамках проекту «Розробка комплексу експериментальних засобів для дослідження впливу факторів навколоземного космічного простору на міцність конструкційних матеріалів» Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

 Стрижало В. А., Скрипник Ю. Д. Методика испытаний конструкционных материалов на циклическую прочность в условиях околоземного космического пространства // Космічна наука і технологія. — 1996. — 2, № 5—6. — С. 38—45.

Стаття надійшла до редакції 19.12.14

В. А. Стрижало, Ю. Д. Скрипник

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко Национальной академии наук Украины, Киев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Описаны две экспериментальные установки для исследования циклической усталости конструкционных материалов в лабораторных условиях. Конструкция первой имитирует орбитальную установку и реализует соответствующую методику испытаний в космических условиях. Для упрощения методика предусматривает испытания лишь в жестком режиме — при заданной в цикле амплитуде общей (упругой и пластической) деформации. Вторая установка предназначена для всестороннего изучения циклических свойств материалов с получением циклических диаграмм деформирования и данных о влиянии доступных видов внешней среды.

Ключевые слова: экспериментальная установка, циклическая усталость, космические условия, образец, конструкционные материалы, диаграмма деформирования.

V. O. Strizhalo, Yu. D. Skrypnyk

Pisarenko Institute of Problems of Strength of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

EXPERIMENTAL SETUP FOR THE INVESTIGATION OF CYCLIC FATIGUE OF STRUCTURAL MATERIALS FOR SPACE APPLICATIONS

Two experimental setups for the investigation of cycle fatigue of structural materials under laboratory conditions are described. The first one simulates the orbital complex with appropriate test methods under space conditions. To simplify experimental means the methods provide only strain control mode with the specified predetermined total cycle amplitude (elastic and plastic) of strain. The second setup was designed for a comprehensive study of materials' cyclic properties with obtaining of cyclic strain diagrams along with the data on the influence of available types of environment.

Key words: experimental facility, cyclic fatigue, space conditions, sample, construction materials, stress-strain diagram.

УДК 539.123.17, 539.12, 539.16, 539.1.08, 53.08, 52

Р. С. Бойко¹, Ф. А. Даневич¹, О. В. Зуєва¹, В. В. Кобичев¹, Л. М. Кобичева¹, Р. В. Кобичев^{1,2}, Б. М. Кропив'янський¹, В. М. Мокіна¹, Д. В. Пода^{1,3}, О. Г. Полішук^{1,4}, А. І. Тимошенко¹, В. І. Третяк^{1,4}, Д. М. Черняк¹

¹ Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, Київ

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

³ Центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція

⁴ Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі «Ла Сапієнца», Рим, Італія

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЙТРИНО І ПОШУКИ ЕФЕКТІВ ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЇ МОДЕЛІ ЧАСТИНОК

Властивості елементарних частинок тісно пов'язані з проблемами космології і астрофізики. Пояснення явища нейтринних осциляцій, природи темної матерії і темної енергії, асиметрії баріонної і антибаріонної речовини у Всесвіті вимагають розширення стандартної моделі частинок, де нейтрино відіграють ключову роль. Вимірювання потоків нейтрино від різних джерел, дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду здатні дати відповіді на фундаментальні питання про природу нейтрино (частинка Дірака чи Майорани?), величину маси і схему масових станів цієї частинки, порушення закону збереження лептонного заряду, порушення СР-симетрії завдяки змішуванню нейтрино та ін. Пошуки гіпотетичних частинок темної матерії методами ядерної спектрометрії покликані дати відповідь на питання про природу і склад темної матерії.

нейтрино.

Ключові слова: нейтрино, стандартна модель елементарних частинок, подвійний бета-розпад, темна матерія.

вступ

Розуміння будови і еволюції Всесвіту неможливе без застосування теорії елементарних частинок і взаємодій між ними [1]. З іншого боку, саме астрономія, астрофізика і космологія своїми спостереженнями темної матерії спонукають розширювати стандартну модель елементарних частинок, у той час як для пояснення темної енергії можуть знадобитися зовсім нові підходи.

Одним із найбільш вражаючих досягнень фізики елементарних частинок (у першу чергу не прискорювальної, або «підземної» фізики) ста-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

ли спостереження явища осциляцій нейтрино у численних експериментах, які вимірюють пото-

ки нейтрино від Сонця, ядерних реакторів, з вер-

хніх шарів атмосфери, прискорювачів. Ці спостереження можна пояснити у припущенні про

наявність масових станів нейтрино, у той час як

спостережувані аромати нейтрино є результатом змішування масових станів. Важливою задачею

є підвищення точності вимірювань у широкому

діапазоні відстаней між джерелом нейтрино і де-

тектором, а також у широкому діапазоні енергій

осциляції нейтрино, поки що не дає можливості визначити величину маси і схему масових станів

нейтрино: вона може бути вироджена, інверто-

вана чи нормальна [43]. Крім того, відкритими

залишаються питання про природу нейтрино

Але точність експериментів, що спостерігають

[©] Р. С. БОЙКО, Ф. А. ДАНЕВИЧ, О. В. ЗУЄВА,

В. В. КОБИЧЕВ, Л. М. КОБИЧЕВА, Р. В. КОБИЧЕВ,

Б. М. КРОПИВ'ЯНСЬКИЙ, В. М. МОКІНА, Д. В. ПОДА,

О. Г. ПОЛІЩУК, А. І. ТИМОШЕНКО, В. І. ТРЕТЯК,

Д. М. ЧЕРНЯК, 2015

(частинка Дірака чи Майорани?) і збереження лептонного заряду. Нейтрино майоранівської природи виглядають привабливими з точки зору теорії, і тому пошуки безнейтринного подвійного бета-розпаду ($0v2\beta$) ядер (процесу, можливого лише за умови, що нейтрино є масивною частинкою Майорани) виглядають найбільш багатообіцяючим шляхом дослідження властивостей нейтрино і слабкої взаємодії. Важливо відмітити, що майоранівська природа нейтрино є одним із можливих пояснень асиметрії баріонної матерії у Всесвіті [27].

Пошуки гіпотетичних частинок темної матерії методами ядерної спектрометрії залишаються однією з ключових задач фізики. Суперечливі дані підземних експериментів (спостереження річних модуляцій сигналу в експерименті DAMA [26], у той час як у ряді інших дослідів очікуваний ефект від ядер віддачі не спостерігається [4, 5, 10]), відсутність спостереження суперсиметричних частинок у прискорювальних експериментах [11, 31] вимагають підвищення чутливості експериментів і пошуків інших кандидатів на роль темної матерії: аксіонів, стерильних нейтрино та ін. Вимірювання потоків нейтрино, пошуки 0v2β-розпаду і темної матерії об'єднує вимога подальшого зниження фону детекторів, розробки нових підходів. Нещодавно розроблені кріогенні сцинтиляційні детектори виглядають найбільш перспективними для вирішення цих задач.

Дана робота підсумовує результати останніх робіт в цих напрямках, виконані в рамках проекту «Супутникові та лабораторні експерименти для досліджень космічних променів, верхніх шарів атмосфери, Сонця, пошуку ефектів за рамками стандартної моделі частинок ядернофізичними методами» в Інституті ядерних досліджень НАН України.

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙТРИНО ВІД СОНЦЯ, ЗЕМЛІ ТА ІНШИХ ДЖЕРЕЛ

Установка Borexino є на сьогоднішній день одним з найбільш потужних нейтринних детекторів [37, 47, 49]. Детектор Borexino був розроблений з метою вимірювання у режимі реального часу спектру нейтрино від розпадів ⁷Be у термоядерних реакціях на Сонці [6]. Успішно виконуючи цю задачу [18, 19], детектор виявився унікальним інструментом для досліджень нейтрино різної природи. Зокрема, уперше в світі здійснено пряме спектрометричне спостереження сонячних нейтрино від синтезу двох протонів (р-р-циклу) та виміряно їхній потік. Нейтрино, які утворюються в результаті протон-протонного синтезу, є головним компонентом потоку сонячних нейтрино. В експерименті уперше був виміряний спектр р-р-нейтрино, який підтверджує, що близько 99 % енергії Сонця, а саме 3.84 · 10²⁶ Вт, генерується саме у р-р-циклі. Експеримент підтверджує стабільність енерговиділення у центрі Сонця за останні сто тисяч років [20]. Ще одним видатним досягненням є спостереження антинейтрино із надр Землі (гео-нейтрино). Виміряний потік антинейтрино 3.9^{+1.6}_{-1.3} (стат.)^{+5.8}_{-3.2} (сист.) подій/(100 тонн детектора за рік) узгоджується з моделлю будови Землі без припущення про наявність активного геореактора в ядрі Землі. Цю гіпотезу відкинуто з довірчою ймовірністю 95 % (у припушенні, що потужність такого реактора не перевищує 3 ТВт) [17, 37, 49].

Завдяки дуже низькому радіаційному фону і великим розмірам детектор Borexino може реєструвати низькоенергетичні електронні нейтрино і антинейтрино, що дозволяє вивчати нейтринні осциляції зі штучними джерелами на коротких відстанях у кілька десятків метрів (проект SoX) [21]. Планується застосувати потужні джерела нейтрино (⁵¹Cr) і антинейтрино (¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr). Очікується, що експеримент буде чутливий до стерильних нейтрино масою на рівні кількох електронвольт. Крім того, буде здійснено пошук магнітного моменту нейтрино, точне вимірювання кута змішування в електрослабкій взаємодії [25, 44]. У 2014 р. розпочато спорудження антинейтринного джерела ¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr з активністю порядку 100 кКі та енергіями антинейтрино до 3 MeB.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЙТРИНО У ПОДВІЙНОМУ БЕТА-РОЗПАДІ АТОМНИХ ЯДЕР

Дослідження подвійного бета-розпаду є одним з пріоритетних напрямків фізики ядра і елементарних частинок завдяки унікальним можливостям визначати природу нейтрино та його масу, схему масових станів, перевірити закон збереження лептонного заряду, існування правих токів у слабкій взаємодії та бозонів Намбу — Голдстоуна (так званих майоронів), ряд інших ефектів за межами стандартної моделі частинок [14, 28, 36, 46, 50].

Чутливість сучасних експериментів усе ще недостатня, щоб визначити схему масових станів нейтрино (можна стверджувати, що найбільш чутливі експерименти відкидають лише вироджену схему [14]). Задачею експериментів наступного покоління є досягнення чутливості до ефективної маси нейтрино на рівні $\langle m_{..} \rangle \sim 0.05 \, \text{eB}$, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино. Для досягнення цієї мети необхідні детектори великої маси (сотні кг досліджуваного ізотопу) з високими ефективністю реєстрації ефекту і енергетичною роздільною здатністю, низьким (в ідеальному випадку нульовим) фоном. Таким вимогам задовольняють низькотемпературні сцинтиляційні детектори [39, 45], у яких сцинтиляційні кристали використовуються як джерело 2β-розпаду і як детектор одночасно (це означає, що кристал має містити у своєму складі елементи, у яких є 2β-активні ізотопи). Важливою є вимога великої енергії розпаду (більше за енергію 2615 кеВ, яка випромінюється у вигляді гамма-квантів при розпаді радіонукліду ²⁰⁸Tl, дочірнього ²³²Th) і можливість збагачення ізотопу у великих кількостях [12].

З огляду на вищевикладене, одним з найбільш перспективних є ядро ¹⁰⁰Мо. Для здійснення експерименту з пошуку 0v2β-розпаду ¹⁰⁰Мо необхідна розробка сцинтиляційних кристалів з молібденом. Найбільш перспективними виглядають молібдати літію (Li₂MoO₄) [15], кальцію (CaMoO₄) [9] і цинку (ZnMoO₄) [38]. В рамках проекту LUMINEU був розроблений кристал ZnMoO₄ із молібдену, збагаченого до 99.5 % ізотопом 100 Мо, масою 171 г з високим виходом кристалу 84 % і достатньо низьким рівнем невідворотних втрат на рівні близько 4 %. Кристал був вирощений за допомогою унікального методу Чохральського з низьким градієнтом температури [40]. Досліджені сцинтиляційні і болометричні властивості детекторів при температурах 15-20 мК. Показано, що за болометричними властивостями та рівнем радіоактивної чистоти матеріал не поступається зразкам із незбагаченого молібдену [13]. Цей результат досягнуто завдяки розробленому в рамках проекту LUMINEU методу глибокої очистки молібдену від радіоактивних елементів та перехідних металів [24, 48]. Нещодавно за такою ж методикою був вирощений ізотопно збагачений кристал з вагою близько 1.4 кг.

Підготовка чутливого експерименту для пошуку $0v2\beta$ -розпаду ¹⁰⁰Мо за допомогою низькотемпературних сцинтиляційних болометрів з кристалами молібдату кальцію із збагаченого молібдену 100 і кальцію, збідненого на 2β -активний ізотоп ⁴⁸Ca (⁴⁰Ca¹⁰⁰MoO₄), ведеться в рамках колаборації AMoRE [41, 42].

Ще одним, не менш привабливим низькотемпературним сцинтилятором, є кристали Li₂MoO₄. Важливими перевагами цього матеріалу є висока концентрація молібдену, відсутність радіоактивних елементів у складі сполуки, відносна простота виробництва сцинтиляційних елементів із збагаченого молібдену. Було розроблено монокристали Li₂MoO₄ (зокрема, один зразок розмірами Ø 40×40 мм) і досліджено люмінесценцію під дією рентгенівського випромінювання, спектри емісії, залежність інтенсивності люмінесценції від температури, фосфоресценцію, термостимульовану люмінесценцію (при температурах до температури рідкого гелію), сцинтиляційні і болометричні властивості (при температурах близько 15 мК) [16].

Однією з найважливіших характеристик спектрометрів для пошуку 2 β -розпаду є рівень фону. У випадку сцинтиляційних детекторів суттєвим джерелом фону є радіоактивна забрудненість фотоелектронних помножувачів (ФЕП). Для зменшення фону сцинтиляційного детектора від ФЕП були запропоновані світловоди з вольфрамату свинцю [33]. Із глибоко очищеного археологічного свинцю [29] був розроблений сцинтиляційний кристал PbWO₄ Ø40 × 83 мм [2], який успішно використовується як світловод у низькофоновому експерименті з пошуку подвійного бета-розпаду ізотопу ¹⁰⁶Cd у підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія) за допомогою сцинтиляційного кристалу вольфрамату кадмію із кадмію, збагаченого ізотопом ¹⁰⁶Cd до 66.4 %. Чутливість експерименту до процесів подвійного електронного поглинання (2є) та поглинання електрона з випромінюванням позитрона (є β^+) у ядрі ¹⁰⁶Cd очікується на рівні $T_{1/2} \sim 10^{20}$ —10²¹ років [22].

Дослідження радіоактивної забрудненості церію мало на меті розробку сцинтиляторів з церієм (або активованих церієм) і дослідження подвійного бета-розпаду ізотопів ¹³⁶Ce, ¹³⁸Ce і ¹⁴²Ce. Найбільш цікавим є ¹³⁶Ce, оскільки це ядро може розпадатися за трьома каналами розпаду: 2є, єβ⁺ і шляхом подвійного позитронного розпаду (2β⁺). Безнейтринні 2є- і єβ⁺-процеси чутливі до гіпотетичних домішок правих токів у слабкій взаємодії. Пошуки 2β-розпаду церію були здійснені на новому рівні чутливості за допомогою наднизькофонової γ-спектрометрії. Встановлено нові обмеження на періоди напіврозпаду ядер ^{136,138,142}Ce на рівні 10¹⁷—10¹⁸ років [23].

ПОШУКИ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

Обладнання, створене для забезпечення проекту Borexino (a came, допоміжний детектор Counting Test Facility [7], який використовувався для перевірки рідкого сцинтилятора для експерименту Borexino) виявилося достатньо потужним для розміщення в ньому низькофонової установки DarkSide. Детектор буде виконувати пошук частинок темної матерії за допомогою двофазової (рідина — газ) часово-проекційної камери, наповненої аргоном, видобутим з надр Землі для зменшення фону від радіоактивного ізотопу ³⁹Аг космогенного походження [3, 30]. Прототип детектора буде містити близько 10 кг аргону (DarkSide-10), наступним кроком буде збільшення маси аргону до 50 кг (DarkSide-50) з перспективою розробки детектора з чутливою масою на рівні кількох тонн.

Підвищення чутливості експериментів з пошуку масивних слабковзаємодіючих частинок вимагає збільшення маси детектора, якомога нижчого фону, чутливості до ядер віддачі різної маси з надзвичайно малою енергією у кілька кеВ. Європейський проект EURECA має на меті спорудження великого кріогенного детектора з різними кристалами (напівпровідниковими і сцинтиляційними) для дослідження широкого діапазону мас частинок темної матерії. Колаборацією було розроблено конструкцію детектора [8], спорудження якого планується розпочати у 2017 р.

Оптимізація умов збирання світлових фотонів у кріогенних сцинтиляційних болометрах є особливо важливою для зниження порогу реєстрації (для пошуку частинок темної матерії) і підвищення відношення ефект/шум (для зниження фону від випадкових збігів подій в експериментах з пошуку 0v2β-розпаду ядра ¹⁰⁰Мо за допомогою кріогенних детекторів [32]). Показано експериментально і підтверджено у розрахунках методом Монте-Карло, що із сцинтиляційними кристалами у формі призми (з 3, 4, 6 гранями) з дифузною поверхнею, оточеними відбивачем світла у формі зрізаного конуса, можна отримати значно більшу ефективність збирання фотонів на фотодетектор, ніж у випадку використання полірованих сцинтиляторів у формі циліндра з циліндричним відбивачем світла (типова конструкція кріогенного модуля у детекторах темної матерії) [34, 35].

висновки

Вимірювання потоків нейтрино від різних джерел за допомогою детектора Вогехіпо здатні дати важливу інформацію не лише про властивості нейтрино (що є ключовими для побудови розширень стандартної моделі елементарних частинок), але й досліджувати внутрішню будову Сонця і Землі. Виключно низький фон детектора Borexino у підземній лабораторії Гран-Сассо дозволяє планувати унікальний експеримент для дослідження осциляцій нейтрино на малих відстанях (метри — десятки метрів, проект SOX), вести пошуки слабковзаємодіючих частинок темної матерії (проект DarkSide).

Дослідження подвійного бета-розпаду вступають у новий етап, коли чутливість експериментів має бути достатньою для реєстрації процесу, якщо нейтрино є частинкою Майорани з ефективною масою, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино близько 0.05 еВ. Для цього ведеться розробка кріогенних сцинтиляційних болометрів з кристалами молібдатів літію, кальцію і цинку із збагаченого ізотопу ¹⁰⁰Мо. Уперше у світі розроблено кристали Zn¹⁰⁰MoO₄ масою

171 г та 1.4 кг із молібдену, збагаченого цим ізотопом. Експеримент з детекторами $Zn^{100}MoO_4$ масою близько кілограма планується розпочати навесні 2015 р. Надалі буде прийняте рішення про підготовку експерименту з пошуку $0v2\beta$ розпаду ¹⁰⁰Mo з масою ізотопа близько 10 кг (з кристалами Li₂¹⁰⁰MoO₄ або Zn¹⁰⁰MoO₄), що буде одним з найбільш чутливих 2 β -експериментів. Метою цих розробок є побудова детектора масою кілька сотень кілограмів для перевірки інвертованої схеми маси нейтрино.

Пошуки взаємодій гіпотетичних частинок темної матерії дають суперечливу інформацію: у той час як в експерименті DAMA спостерігаються річні модуляції сигналу (які можна пояснити взаємодією частинок темної матерії з матеріалом детектора), ряд інших експериментів не бачить ефекту. Необхідно підвищувати чутливість таких експериментів шляхом збільшення маси (як це заплановано у проекті EURECA), а також вести пошуки інших можливих кандидатів на роль темної матерії, з яких найбільш привабливими виглядають аксіони і стерильні нейтрино.

Описані дослідження були частково підтримані проектом № 9/14 «Супутникові та лабораторні експерименти для досліджень космічних променів, верхніх шарів атмосфери, Сонця, пошуку ефектів за рамками стандартної моделі частинок ядернофізичними методами» в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

- 1. Долгов А. Д. Космология и элементарные частицы, или небесные тайны // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2012. **43**, вып. 3. С. 528—572.
- Ковтун Г. П., Бойко Р. С., Даневич Ф. А. и др. Производство и свойства низкофоновых сцинтилляторов вольфраматов кадмия и свинца для поиска двойного бета-распада // Ядерна фізика та енергетика. 2014. 15. С. 92—100.
- Aalseth C. E., Agnes P., Alexander T., et al. DarkSide // Annual Report Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 2013. Assergi 2014. – P. 71–79.
- 4. Agnese R., Ahmed Z., Anderson A. J., et al. Silicon detector dark matter results from the final exposure of CDMS II // Phys. Rev. Lett. 2013. 111. 251301. 6 p.

- Akerib D. S., Araujo H. M., Bai X., et al. First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility // Phys. Rev. Lett. - 2014. -112. - 091303. - 7 p.
- Alimonti G., Arpesella C., Back H., et al. Science and technology of Borexino: a real-time detector for low energy solar neutrinos // Astropart. Phys. 2002. 16, N 3. P. 205–234.
- Alimonti G., Arpesella C., Bacchiocchi G., et al. A large-scale low-background liquid scintillation detector: the counting test facility at Gran Sasso // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 1998. – 406, N 3. – P. 411–426.
- Angloher G., Armengaud E., Augier C., et al. EURECA Conceptual Design Report // Phys. Dark Universe. – 2014. – 3. – P. 41–74.
- Annenkov A. N., Buzanov O. A., Danevich F. A., et al. Development of CaMoO₄ crystal scintillators for a double beta decay experiment with ¹⁰⁰Mo // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2008. – 584. – P. 334–345.
- Aprile E., Arisaka K., Arneodo F., et al. First dark matter results from the XENON100 experiment // Phys. Rev. Lett. – 2010. – 105. – 131302. – 5 p.
- Baer H., Barger V., Huang P., Tata X. Natural supersymmetry: LHC, dark matter and ILC searches // J. High Energy Phys. 2012. 05. 109. 28 p.
- 12. Barabash A. S. The new generation of double beta decay experiments: are there any limitations? // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2012. 39, N 8. 085103. 8 p.
- 13. Barabash A. S., Chernyak D. M., Danevich F. A., et al. Enriched $Zn^{100}MoO_4$ scintillating bolometers to search for $0v2\beta$ decay of ^{100}Mo with the LUMINEU experiment // Eur. Phys. J. C. -2014. 74. 3133. 7 p.
- Barea J., Kotila J., Iachello F. Limits on neutrino masses from neutrinoless double-β decay // Phys. Rev. Lett. – 2012. – 109. – 042501. – 4 p.
- Barinova O. P., Danevich F. A., Degoda V. Ya., et al. First test of Li₂MoO₄ crystal as a cryogenic scintillating bolometer // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2010. – 613. – P. 54–57.
- 16. Bekker T. B., Coron N., Danevich F. A., et al. Aboveground test of an advanced Li₂MoO₄ scintillating bolometer to search for neutrinoless double beta decay of ¹⁰⁰Mo // Astropart. Phys. – 2016. – 72. – P. 38–45.
- Bellini G., Benziger J., Bonetti S., et al. Observation of geo-neutrinos // Phys. Lett. B. – 2010. – 687, N 4-5. – P. 299–304.
- Bellini G., Benziger J., Bick, D., et al. Precision Measurement of the ⁷Be Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino // Phys. Rev. Lett. 2011. 107. 141302. 5 p.
- Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy // Phys. Rev. D. – 2014. – 89. – 112007. – 68 p.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

- Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun // Nature. – 2014. – 512. – P. 383–386.
- Bellini G., Benziger J., Bick D., et al. Borexino: recent solar and terrestrial neutrino results and description of the SOX project // Proc. of the 2013 Europhysics conference on High Energy Physics, 18–24 July 2013, Stockholm, Sweden, Proceedings of Science 2014 (EPSHEP2013) 529. – 8 p.
- Belli P., Bernabei R., Boiko R. S., et al. Search for double-β decay processes in ¹⁰⁶Cd with the help of a ¹⁰⁶CdWO₄ crystal scintillator // Phys. Rev. C.—Nucl. Phys. 2012. 85. 044610. 12 p.
- Belli P., Bernabei R., Boiko R. S. et al. Search for double beta decay of ¹³⁶Ce and ¹³⁸Ce with HPGe gamma detector // Nucl. Phys. A. – 2014. – 930. – P. 195–208.
- Berge L., Boiko R. S., Chapellier M., et al. Purification of molybdenum, growth and characterization of medium volume ZnMoO₄ crystals for the LUMINEU program // J. Instrum. – 2014. – 09. – P06004. – 18 p.
- 25. Berguno D. B. Sterile neutrino search through disappearance studies with a high-intensity ⁵¹Cr source and the Borexino detector // Proceedings of the XV International Workshop on Neutrino Telescopes, March 11—15 2013, Venice, Italy, Proceedings of Science 2014 (Neutel2013) 065. — 4 p.
- 26. Bernabei R., Belli P., Cappella F., et al. New results from DAMA/LIBRA // Eur. Phys. J. C. – 2010. – 67, N 1-2. – P. 39–49.
- 27. *Bilenky S. M.* Neutrino Majorana // Ann. Fondation Louis de Broglie. – 2006. – **31**, N 2–3. – P. 139–156.
- Bilenky S. M., Giunti C. Neutrinoless double-beta decay: a brief review // Mod. Phys. Lett. A. - 2012. - 27. -1230015. - 22 p.
- Boiko R. S., Virich V. D., Danevich F. A., et al. Ultrapurification of archaeological lead // Inorg. Mater. 2011. 47. – P. 645–648.
- Bossa M. (on behalf of the DarkSide collaboration). Dark-Side-50, a background free experiment for dark matter search // J. Instrum. – 2014. – 09. – C01034. – 11 p.
- Bottino A., Fornengo N., Scopel S. Phenomenology of light neutralinos in view of recent results at the CERN Large Hadron Collider // Phys. Rev. D—Parts and Fields. — 2012. — 85. — 095013. — 9 p.
- Chernyak D. M., Danevich F. A., Giuliani A., et al. Rejection of randomly coinciding events in ZnMoO₄ scintillating bolometers // Eur. Phys. J. C. 2014. 74. 2913. 6 p.
- 33. Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychev V. V., et al. Application of PbWO₄ crystal scintillators in experiment to search for 2 β decay of ¹¹⁶Cd // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2006. – **556**. – P. 259–265.
- 34. Danevich F. A., Kobychev V. V., Kobychev R. V., et al. Impact of geometry on light collection efficiency of scin-

tillation detectors for cryogenic rare event searches // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. -2014. -336. - P. 26–30.

- Danevich F. A., Kobychev R. V., Kobychev V. V., et al. Optimization of light collection from crystal scintillators for cryogenic experiments // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2014. – 744. – P. 41–47.
- Deppisch F. F., Hirsch M., Päs H. Neutrinoless double-beta decay and physics beyond the standard model // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2012. – 39. – 124007. – 23 p.
- Giammarchi M. G. (on behalf of the Borexino Collaboration). Solar and geoneutrino physics with Borexino // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Assoc. Equip. – 2014. – 742. – P. 250–253.
- 38. Gironi L., Arnaboldi C., Beeman J. W., et al. Performance of ZnMoO₄ crystal as cryogenic scintillating bolometer to search for double beta decay of molybdenum // J. Instrum. – 2010. – 5. – P11007. – 12 p.
- Giuliani A. Neutrino physics with low-temperature detectors // J. Low Temp. Phys. 2012. 167, N 5-6. P. 991–1003.
- 40. *Grigoriev D. N., Danevich F. A., Shlegel V. N., Vasiliev Ya.*V. Development of crystal scintillators for calorimetry in high energy and astroparticle physics // J. Instrum. 2014. 09. C09004. 8 p.
- Kim G. B., Choi S., Jang Y. S., et al. Thermal model and optimization of a large crystal detector using a metallic magnetic calorimeter // J. Low Temp. Phys. - 2014. -176. - P. 637-643.
- Lee S. J., Choi J. H., Danevich F. A., et al. The development of a cryogenic detector with CaMoO₄ crystals for neutrinoless double beta decay search // Astropart. Phys. 2011. 34. P. 732–737.
- Mohapatra R. N., Antusch S., Babu K. S., et al. Theory of neutrinos: A white paper // Repts Progr. Phys. – 2007. – 70, N 11. – P. 1757–1867.
- Pallavicini M. The SOX project: a search for sterile neutrinos with BoreXino // Proceedings of the XV International Workshop on Neutrino Telescopes, March 11–15 2013 Venice, Italy, Proceedings of Science 2014 (Neutel2013) 026. 10 p.
- Pirro S., Beeman J. W., Capelli S., et al. Scintillating double-beta-decay bolometers // Phys. Atom. Nucl. – 2006. – 69, N 12. – P. 2109–2116.
- 46. *Rodejohann W.* Neutrino-less double beta decay and particle physics // Int. J. Mod. Phys. E. – 2011. – 20, N 9. – P. 1833–1930.
- Rossi N., Bellini G., Benziger J., et al. The Borexino experiment: Recent results and future plans // Nuovo cim. 2014. 37. P. 119–123.
- 48. Shlegel V. N., Berge L., Boiko R. S., et al. Purification of molybdenum oxide, growth and characterization of medium size zinc molybdate crystals for the LUMINEU
- ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

program // EPJ Web of Conf. — 2014. — **65**. — 03001. — 6 p.

- Testera G. (on behalf of the Borexino Collaboration). Solar and geo neutrinos in Borexino: summary of the Phase-I measurements and recent results // Proceedings of the XV Workshop on Neutrino Telescopes, 11–15 March 2013, Venice, Italy, Proceedings of Science 2014 (Neutel 2013) 008. – 10 p.
- Vergados J. D., Ejiri H., Šimkovic F. Theory of neutrinoless double-beta decay // Repts Progr. Phys. – 2012. – 75, 106301. – 52 p.

Стаття надійшла до редакції 29.12.14

Р. С. Бойко¹, Ф. А. Даневич¹, Е. В. Зуева¹, В. В. Кобычев¹,

Л. Н. Кобычева¹, Р. В. Кобычев^{1,2}, Б. Н. Кропивянский¹,

В. М. Мокина¹, Д. В. Пода^{1,3}, О. Г. Полищук^{1,4},

А. И. Тимошенко¹, В. И. Третяк^{1,4}, Д. Н. Черняк¹

¹Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, Киев,

² Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт», Киев ³ Центр ядерной физики и материаловедения,

Орсе, Франция

⁴ Национальный институт ядерной физики, отделение в Риме «Ла Сапиенца», Рим, Италия

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО И ПОИСКИ ЭФФЕКТОВ ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ЧАСТИЦ

Свойства элементарных частиц тесно связаны с проблемами космологии и астрофизики. Объяснение явления нейтринных осцилляций, природы темной материи и темной энергии, асимметрии барионного и антибарионного вещества во Вселенной требуют расширения стандартной модели частиц, где нейтрино играют ключевую роль. Измерение потоков нейтрино от различных источников, исследования безнейтринного двойного бета-распада способны дать ответы на фундаментальные вопросы о природе нейтрино (частица Дирака или Майораны), величину массы и схему массовых состояний этой частицы, нарушение закона сохранения лептонного заряда, нарушение СР-симметрии благодаря смешиванию нейтрино и др. Поиски гипотетических частиц темной материи методами ядерной спектрометрии призваны дать ответ на вопрос о природе и составе темной материи.

Ключевые слова: нейтрино, стандартная модель элементарных частиц, двойной бета-распад, темная материя.

R. S. Boiko¹, F. A. Danevich¹, O. V. Zueva¹, V. V. Kobychev¹, L. M. Kobycheva¹, R. V. Kobychev^{1,2}, B. N. Kropivyansky¹, V. M. Mokina¹, D. V. Poda^{1,3}, O. G. Polischuk^{1,4}, A. I. Tymoshenko¹, V. I. Tretyak^{1,4}, D. M. Chernyak¹

¹Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine , Kyiv, Ukraine ²National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

³CSNSM, Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière, CNRS/IN2P3, Université Paris-Sud, Orsay, France

⁴INFN, Sezione di Roma "La Sapienza", Rome, Italy

PROPERTIES OF NEUTRINO AND SEARCH FOR EFFECTS BEYOND THE STANDARD MODEL

Particles' properties are closely related to cosmology and astrophysics. Explanation of neutrino oscillations, nature of dark matter and dark energy, baryon-antibaryon asymmetry call for extension of the Standard Model of particles. Properties of neutrino play an important role in the development of elementary particles models. Measurements of neutrinos from various sources, search for neutrinoless double beta decay are able to answer the key questions on the neutrino nature (whether it is Majorana or Dirac particle?), the absolute mass scale and the neutrino mass hierarchy, the lepton number conservation, the CP-symmetry violation due to neutrino mixing, etc. Search for interaction of hypothetical dark matter particles could answer to the question about nature and composition of dark matter in the Universe.

Key words: neutrinos, standard model of elementary particles, double beta decay, dark matter.

УДК 523.164.42

О. О. Станіславський, О. О. Коноваленко, В. В. Захаренко, І. М. Бубнов, Я. С. Вольвач, В. В. Доровський, А. О. Коваль, К. Ю. Милостна Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

СКООРДИНОВАНІ СИНХРОННІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДАМИ НАЗЕМНО-КОСМІЧНОЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ

Наведено результати досліджень радіовипромінювання об'єктів Сонячної системи і планет шляхом скоординованих міжнародних спостережень за допомогою найбільших в світі низькочастотних українських радіотелескопів, а також космічних місій. Показано високу ефективність спостережень на декаметрових радіохвилях для вивчення сонячного і планетного радіовипромінювання, викидів корональних мас, космічної погоди, блискавок на планетах.

Ключові слова: радіовипромінювання блискавок планет, кутова структура джерела сонячних сплесків, магнітні поля сонячної корони, низькочастотна радіоастрономія, космічні місії

Зараз в усьому світі відбувається бурхливий прогрес у розвитку низькочастотної радіоастрономії (декаметровий і метровий діапазони довжин хвиль). В Європі, США, Австралії будуються радіотелескопи нового покоління для функціонування на частотах нижче 100 МГц (LOFAR, E-LOFAR, LSS, MWA, LWA Ta iHIII) [4, 11]. CTaла очевидною надвисока інформативність низькочастотної радіоастрономії, яка дає дані, що недоступні іншим методам астрофізики, у вивченні Сонячної системи та Всесвіту в цілому. Значною мірою це було доведено українською школою низькочастотної декаметрової радіоастрономії завдяки створенню, модернізації і використанню найбільших у світі радіотелескопів УТР-2 та УРАН (8—30 МГц), а також новітньої антенної решітки ГУРТ (8-70 МГц) [2, 8]. Ці інструменти дозволили отримати велику кількість пріоритетних, добре відомих в світі наукових результатів, у тому числі у міжнародних дослідженнях [5]. З іншого боку, майже з самого початку космічної ери активно реалізуються космічні проекти з використанням бортових низькочастотних радіоастрономічних систем. Це зумовлено тим, що космічне радіовипромінювання не досягає Землі на частотах f < 8 - 12 МГц (а інколи навіть f < 15 МГц), оскільки земна іоносфера діє як металевий екран. Крім того, як завжди, для покращення досліджень цікаво наблизитися до об'єкта досліджень. Зараз успішно функціонують різноманітні низькочастотні місії (діапазон частот 1-16 МГц) STEREO, WIND, «Cassini», вже запущено апарат «Juno», планується здійснити місії «Solar Orbiter», «FarSide Explorer» та інші. Але вказані місії мають дуже суттєвий недолік — через технічні обмеження космічні антенні системи складаються всього із кількох елементів і тому дають дуже низьку чутливість [10]. Крім цього, такі космічні апарати (КА) не завжди можуть наблизитися достатньо близько до досліджуваних об'єктів (наприклад Сонця), а

[©] О. О. СТАНІСЛАВСЬКИЙ, О. О. КОНОВАЛЕНКО,

В. В. ЗАХАРЕНКО, І. М. БУБНОВ, Я. С. ВОЛЬВАЧ,

В. В. ДОРОВСЬКИЙ, А. О. КОВАЛЬ, К. Ю. МИЛОСТНА, 2015

термін їхнього життя і велике коло завдань істотно обмежують можливості таких місій.

Декілька років тому українські радіоастрономи запропонували нову концепцію скоординованих спостережень об'єктів Сонячної системи та інших космічних об'єктів за допомогою найбільших українських радіотелескопів і космічних місій [5]. Наземні радіотелескопи мають набагато більшу чутливість, часову, частотну і просторову роздільні здатності, динамічний діапазон і спільну з космічними інструментами смугу частот. Було показано, що такий підхід дає дуже багато переваг в дослідженнях спорадичного і спокійного сонячного і планетного радіовипромінювання, викидів корональних мас, космічної погоди, сонячного вітру, блискавок на планетах. Деякі подібні міжнародні експерименти вже були успішно реалізовані, опубліковані і схвалені міжнародною спільнотою в Європі і США. Вкрай назріла необхідність подальшого розвитку цієї концепції, доведення її ефективності і актуальності, проведення нових вимірювань вже зараз і підготовки майбутніх міжнародних наземно-космічних досліджень.

У цій статті наводяться деякі недавні результати досліджень з метою підвищення чутливості, роздільної здатності, смуги аналізу, надійності досліджень радіовипромінювання Сонця, міжпланетного середовища, планет шляхом скоординованих міжнародних спостережень за допомогою найбільших в світі низькочастотних українських радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ, а також космічних місій STEREO, WIND, «Cassini» та інші.

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ БЛИСКАВОК НА ПЛАНЕТАХ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Блискавки на планетах Сонячної системи (крім Землі) було відкрито за допомогою КА на рубежі 1980-х рр. Однак, на жаль, вимірювання за допомогою КА мають дуже невисоку часову роздільну здатність — десятки мілісекунд. Наявне приймальне обладнання, розроблене в Радіоастрономічному інституті НАН України, дозволило проводити дослідження структури електростатичних розрядів на Сатурні з найвищою доступною часовою роздільною здатністю (приблизно 15 нс). Таким чином, за допомогою цього обладнання була досліджена мікроструктура блискавок, яка раніше була відкрита на радіотелескопі УТР-2 [3]. В рамках досліджень електростатичних розрядів на Сатурні спільно з КА «Cassini» були отримані такі результати:

в результаті обробки 30 % високошвидкісних даних шторму на Сатурні зареєстровано близько 4000 подій — компонентів мікроструктури блискавок;

виявлені субмілісекундні сплески містять основну енергію блискавок (рис. 1, *a*);

у блискавках спостерігаються мікросекундні сплески, які, ймовірно, можуть пояснити достатньо «плоский» спектр електростатичних розрядів, реєстрований КА «Cassini» у смузі 1—16 МГц;

при високій часовій роздільній здатності необхідно компенсувати дисперсійну затримку в середовищі розповсюдження радіосигналу (рис. 1, δ);

усереднені профілі блискавок показують, що, як правило, мілісекундні сплески починається з короткого (мікросекундного) сплеску (рис. 1, *в*);

часової роздільної здатності апаратури достатньо, щоб стверджувати, що можливий внесок у загальну енергію менш тривалих (наносекундних) імпульсів буде малим (рис. 1, *г*).

При виконанні цього аналізу були застосовані спеціальні алгоритми обробки, що дозволяють очищати експериментальні дані від перешкод природного та штучного походження [1]. Наступний крок у дослідженні електростатичних розрядів (блискавок) є пошук їх на інших планетах сонячної системи. З цією метою нещодавно були проведені тривалі спостереження радіовипромінювання Урана у період наявності в атмосфері планети великомасштабних хмарних утворень. Обробка даних наразі триває.

ДОСЛІДЖЕННЯ КУТОВОЇ СТРУКТУРИ СОНЯЧНИХ СПЛЕСКІВ

Кутові розміри джерел сонячних сплесків досі недостатньо глибоко вивчені на низьких частотах. Це пояснюється тим, що такі спостереження вельми трудомісткі, але вони вкрай необхідні для розуміння особливостей природи виникнення самих сплесків, а також для розуміння явищ, пов'язаних з ними (корональних викидів маси,



Рис. 1. Різні часові масштаби блискавок в атмосфері Сатурна: *a* — секундні, субмілісекундні та мікросекундні компоненти на динамічних спектрах, *б* — усунення дисперсійної затримки в середовищі поширення сигналу, *в* — середній субмілісекундний сплеск з початковою мікросекундною складовою, *г* — індивідуальний сплеск з часовою роздільною здатністю 0.5 мкс (після усунення дисперсійної затримки)

спалахів тощо). За допомогою синтезованої матриці із 125 променів діаграми спрямованості на телескопі LOFAR були виконані спостереження просторових характеристик сплесків III типу [7]. Результати цих спостережень засвідчили, що зазначені сплески сталися на висотах, які перевищують значення, передбачені 1D-моделями радіальної електронної щільності, і це пов'язано з розширенням фронту корональних викидів маси. В аналізі останніх використовувалися синхронні дані KA SDO і SOHO.

Слід зауважити, що для вивчення просторових властивостей сплесків III і IIIb типів також було застосовано геліограф українського радіотелескопу УТР-2 [6]. Кожна його геліограма складається з 40 точок (променів діаграми спрямованості) в результаті послідовного сканування в UV-площині, де сигнали кожного променя записуються з високими часовим (2.482 мс) та спектральним (4 кГц) роздільними здатностями. Швидкість отримання геліограм складає один кадр за 3 с. За допомогою таких спостережень ми отримуємо тривимірну структуру кутової еволюції джерела сонячного сплеску (в UV-площині на окремих частотах в залежності від часу). З реєстрацій геліографа добре видно, що тривалість



Рис. 2. a — динамічний спектр, зареєстрований на УТР-2 10 квітня 2013 р. Початок відліку по осі часу відповідає 09:33:47 UT; δ — послідовний запис, отриманий за допомогою геліографічних вимірювань; e — еволюція положення максимуму джерела сплеску від частоти і часу

сплеску збільшується зі зменшенням частоти (рис. 2, a). Крім того, пік інтенсивності сплеску рухається вочевидь у бік низьких частот (рис. 2, b), тобто пучок електронів надходить від Сонця до великих висот сонячної корони (рис. 2, b). Еволюція піку в часі від кадру до кадру вказує напрямки руху джерела цього сплеску. З огляду великої різноманітності на низьких частотах реєстрованих сонячних сплесків (II, III і IV типів, спайків, дрейфуючих пар та ін.) становить інтерес і планується у майбутньому проведення аналогічних вимірювань для різних типів сплесків. Це дозволяє спільно з даними КА виявити, яке місце в сонячній короні займає джерело обраного сплеску серед інших одночасних проявів сонячної активності (наприклад, корональних викидів маси).

ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОСКОПІЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ У СОНЯЧНОЇ КОРОНІ

Сонячна активність дуже тісно пов'язана з еволюцією магнітних полів на Сонці. Тому їхнє вимірювання різними способами, особливо в сонячній короні, дуже важливе для сонячної астрофізики. Одним із цікавих засобів визначення макроскопічних магнітних полів у сонячній короні є аналіз частотно-часових властивостей сонячних сплесків, на які корональне магнітне поле впливає. З цією метою було досліджено сплеск типу зебра-структура, який спостерігався 2 червня 2011 р. на УТР-2. Його аналіз дозволяє встановити зв'язок цього сплеску з бернштейновими модами і визначити рівень магнітних полів у верхніх шарах корони. Для зменшення впливу модельних уявлень отриманий результат порівнювався з величиною магнітного поля зі спостережень сплеску II типу з розщепленням смуг, який був зареєстрований годиною пізніше. Завдяки даним KA GOES і STEREO вдалося встановити, що обидва сплески з'явилися з однакових частин корони. Розщеплення смуг сплеску II типу є наслідком механізму генерації цього сплеску завдяки ударній хвилі, що дуже відрізняється від механізму генерації зебра-структури на гармоніках гіромагнітної частоти. Разом це дозволяє дослідити магнітне поле корони двома різними способами. Порівняння значення магнітного поля з цих спостережень показують їхню повну згоду і дорівнюють 43 ± 3 мкТл на відстані 1.95 сонячних радіусів від центра Сонця [9]. Знижена величина коронального поля пояснюється особливостями затяжного мінімуму сонячної активності.

Проведені в рамках роботи дослідження дозволили отримати нові результати, що стосуються спорадичного радіовипромінювання Сонця, магнітного поля корони та радіовипромінювання блискавок на планетах Сонячної системи за допомогою скоординованих міжнародних спостережень на найбільших в світі низькочастотних українських радіотелескопах, а також космічних місій. Усе це дозволяє стверджувати, що виконання таких досліджень можна реалізувати з мінімальними витратами в рамках програми, спрямованій на підтримку участі українських вчених у виконанні міжнародних космічних проектів.

Автори вдячні командам космічних місій «Cassini», STEREO, GOES, SOHO, SDO за можливість роботи з даними вимірювань цих КА. Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (Державний реєстраційний № 0114U002814).

- Васильева Я. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Зарка Ф. и др. Декаметровый обзор северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Первые результаты // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — 19, № 3. — С. 197—205.
- 2. Коноваленко А. А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиофизика и радиоастрономия. — 2005. — 10, № 5. — С. 86—115.
- 3. *Милостная К. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. и др.* Тонкая временная структура молний на Сатурне // Радиофизика и радиоастрономия. 2014. 19, № 1. С. 10—19.
- Ellingson S. W., Clarke T. E., Cohen A., et al. The long wavelength array // Proc. IEEE. – 2009. – 97, N 8. – P. 1421–1430.
- Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., et al. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope // Experim. Astron. – 2013. – 36, N 1-2. – P. 137–154.
- Koval A. A., Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A. Angular study of the III type solar bursts by Ukrainian decameter heliograph of UTR-2 // EGU General Assembly. — Vienna, Austria, 2014. — EGU2014-655.
- Morosan D. E., Gallagher P. T., Zucca P., et al. LOFAR tied-array imaging of Type III solar radio // Astron. and Astrophys. – 2014. – 568. – A67.
- Stanislavsky A. A., Bubnov I. N., Konovalenko A. A., et al. First Radio Astronomy Examination of the Low-Frequency Broad-Band Active Antenna Subarray // Adv. Astron. — 2014. — 2014. — Article ID 517058.
- Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Koval A. A., et al. Coronal magnetic field strength from decameter zebrapattern observations: complementarity with band-splitting measurements of associated type II burst // Solar Phys. – 2015. – 290, N 1. – P. 205–218.
- 10. Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Rucker H. O., et al. Antenna Performance Analysis for Decameter Solar

Radio Observations // Astron. Nachr. – 2009. – **330**, N 7. – P. 691–697.

Tingay S. J., Goeke R., Bowman J. D., et al. The Murchison Widefield array: the square Kilometre array precursor at low radio frequencies // Publ. Astron. Soc. Austral. – 2013. – 30. – Article e007.

Стаття надійшла до редакції 18.12.14

А. А. Станиславский, А. А. Коноваленко, В. В. Захаренко, И. Н. Бубнов, Я. С. Вольвач,

В. В. Доровский, А. А. Коваль, К. Ю. Милостная

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

СКООРДИНИРОВАННЫЕ СИНХРОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДАМИ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

Приведены результаты исследований радиоизлучения объектов Солнечной системы путем скоординированных международных наблюдений с помощью крупнейших в мире низкочастотных украинских радиотелескопов, а также космических миссий. Показана высокая эффективность наблюдений на декаметровых радиоволнах для изучения солнечного и планетного радиоизлучения, выбросов корональных масс, космической погоды, молний на планетах.

Ключевые слова: радиоизлучения молний планет, угловая структура источников солнечных всплесков, магнитные поля солнечной короны, низкочастотная радиоастрономия, космические миссии

A. A. Stanislavsky, A. A. Konovalenko, V. V. Zakharenko, I. N. Bubnov, Ya. S. Volvach,

V. V. Dorovskyy, A. A. Koval, K. Yu. Mylostna

Institute of Radio Astronomy

of the National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv

COORDINATED SYNCHRONOUS OBSERVATIONS OF SOLAR SYSTEM OBJECTS USING THE GROUND- AND SPACE-BASED METHODS OF LOW-FREQUENCY RADIO ASTRONOMY

The results of investigations of the Solar System objects by the coordinated international observations using the world's largest low-frequency Ukrainian radio telescopes and space missions are presented. They are in favor for a high efficiency of decameter-wavelength observations for the studies of solar and planetary radio emissions, coronal mass ejections, space weather and planetary thunderstorms.

Key words: radio emission from planet thunderstorms, angular structure of solar burst sources, magnetic fields of solar corona, low-frequency radio astronomy, space missions

УДК 528.2:629.78

О. А. Хода

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКИХ ПЕРМАНЕНТНЫХ ГНСС-СТАНЦИЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1632—1708

В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины были обработаны наблюдения ГНСС-спутников на перманентных станциях, расположенных в Украине и в Восточной Европе, для GPS-недель 1632—1708. Обработка была выполнена с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0». В результате получены оценки координат ГНСС-станций в системе координат IGS08 и оценки зенитных тропосферных задержек для всех станций, в том числе и для новых станций украинских коммерческих ГНСС-сетей «TNT-TPI GNSS Network» і «System.NET». Полученные решения соответствуют по качеству комбинированным решениям Европейськой перманентной ГНСС-сети.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), Международная земная система координат (ITRF), IGS08, координаты станций, зенитные тропосферные задержки.

В мае 2010 г. Центр Международной референсной земной системы координат (ITRS Centre) Международной службы вращения Земли и референсных систем (IERS) объявил о выпуске новой реализации Международной референсной земной системы координат ITRF2008 [4], которая основывается на результатах переобработки наблюдений, выполненных с помощью четырёх техник космической геодезии (одна из них -GPS). При переобработке GPS-наблюдений для создания ITRF2008 использовались абсолютные калибровки комбинаций антенна-купол согласно модели igs05.atx [8]. Для согласования с новой моделью калибровок igs08.atx [7] Международная ГНСС-служба (IGS) ввела свою реализацию системы координат ITRF2008 — IGS08 [6]. IGS08 задаётся координатами 232 перманентных ГНСС-станций. Координаты 65 станций были уточнены для согласования с моделью калибровок igs08.atx, координаты остальных 167 станций совпадают с координатами из каталога ITRF2008. Несмотря на эти отличия в координатах, значения параметров преобразования Гельмерта между системами координат IGS08 и ITRF2008 считаются равными нулю.

Все продукты Международной ГНСС-службы, в том числе точные эфемериды GPS- и ГЛОНАСС-спутников, координаты и скорости перманентных ГНСС-станций, для GPS-недель 1632—1708 (17 апреля 2011 г. — 6 октября 2012 г.) базировались на системе координат IGS08.

В Центре анализа ГНСС-данных Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО) для этого периода проведена регулярная обработка данных наблюдений ГНСС-спутни-ков на перманентных станциях, расположенных в Украине и в Восточной Европе, с целью определить координаты станций в системе координат IGS08.

[©] О. А. ХОДА, 2015



Рис. 1. Схема расположения перманентных ГНСС-станций «базовой» сети

Сеть перманентных ГНСС-станций можно условно разделить на две части. Первая часть, назовём её «базовой» (рис. 1), состоит из 40 станций и мало отличается от сети станций, использовавшейся при предыдущей регулярной обработке для определения координат станций в системе IGS05 [3]. Станция «Трабзон» (TRAB) прекратила свою работу ещё в ноябре 2007 г. Наблюдения на станции «Шацк» (SHAZ) перестали поступать в ГАО НАН Украины начиная с 2010 г. В то же время в «базовую» сеть была включена новая станция «Короп» (KORP).

Перманентная GPS-станция «Короп» была установлена 19 июля 2011 г. совместными усилиями ГАО НАН Украины и Черниговского государственного института экономики и управления. Станция расположена в здании отдела Государственного агентства земельных ресурсов Украины в Коропском районе Черниговской области. GPS-антенна установлена на крыше здания. В рассматриваемый период времени на станции «Короп» был установлен комплект GPS-аппаратуры фирмы «Trimble Navigation Ltd.»: GPS-приёмник «Trimble 4000SSi» (код IGS: TRIMBLE 4000SSI) и GPS-антенна дизайна Choke-ring (код IGS: TRM29659.00) без купола. Регулярные наблюдения GPS-спутников на станции «Короп» начаты 30 июля 2011 г.

Вторая часть, назовём её «коммерческой» (рис. 2), формировалась из перманентных ГНСС-



Рис. 2. Схема расположения перманентных ГНСС-станций сетей «TNT-TPI GNSS Network» и «System.NET»

станций украинских коммерческих ГНСС-сетей «TNT-TPI GNSS Network» и «System.NET».

Перманентная сеть «TNT-TPI GNSS Network» (https://net.tnt-tpi.com/page) создана ООО ТНТ-ТПИ (г. Днепропетровск), эксклюзивным дистрибьютором корпорации «Торсоп» (Япония) в Украине. Станции сети расположены в основном в Среднем и Нижнем Поднепровье. По состоянию на 6 октября 2012 г. в сеть входило 22 станции. Перечень станций и их оборудование показаны в табл. 1. Кроме файлов ГНСС-наблюдений, на станциях сети пользователям предоставляется доступ к корректирующей информации в формате RTCM по протоколу NTRIP.

Перманентная сеть «System.NET» (http:// systemnet.com.ua), созданная ЧАО «Систем Солюшнс» (г. Киев), начала работу 19 декабря 2011 г. До 6 октября 2012 г. было установлено десять новых станций (в скобках после идентификаторов указаны номера DOMES): «Березовка» (BERZ, 15511M001), «Канев» (SHEV, 15515M001), «Киев/Дарница» (KVDA, 15506M001), «Магдалиновка» (MAGD, 15512M001), «Малин» (MALN, 15507M001), «Нежин» (NIZH, 15508M001), «Никополь» (NKPL, 15513M001), «Сквира» (SKVR, 15509М001), «Славутич» (SLVC, 15510М001), «Великая Михайловка» (VELM, 15514М001). Все станции оборудованы ГНСС-приёмниками «LEICA GR10» и антеннами «LEIAR10» без купола. Такое же оборудование было установлено на станции «Днепропетровск» (DNMU). Станция DNMU возобновила свою работу 11 июня 2012 г. и также была включена в сеть «System. NET». Через NTRIP-сервер сети потребители могут получить доступ к сформированным разными методами RTK-поправкам в различных форматах.

Таким образом, общее количество станций в сети составило 72. Диаграмма наблюдений на станциях представлена на рис. 3.

ГНСС-наблюдения на всех станциях сети были обработаны в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» [5] согласно действовавшим в тот период требованиям Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN). Обработка была выполнена в следующей последовательности:

 предварительная обработка суточных сессий наблюдений;

Таблица І. Перман	ентные станции сети «TNT-TPI GNSS Network»			
Станция (номер DOMES)	Расположение	Приёмник	Антенна	Купол
BCRV	г. Белая Церковь	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
BGSL	г. Богуслав (Киевская обл.)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
CHRT	г. Чертков	TPS HGGDT	TPSPG_A1	TPSD
DIZU	г. Днепропетровск	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
DNCK	г. Донецк	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE; TPSD (c 15.12.2011 r.)
FRAN	г. Ивано-Франковск	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
KIRV	г. Кировоград	TPS GB-500	TPSPG_A1	NONE; TPSD (c 25.12.2001 r.)
KMST (12315M001)	г. Киев (Метрострой)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
KRRG	г. Кривой Рог	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
KZLE	пгт. Козелец (Черниговская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
KZLS	пгт. Козельщина (Полтавская обл.)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
NIKL	г. Николаев	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE; TPSD (c 10.10.2011 r.)
NMSH	пгт. Немешаево (Киеская обл.)	TPS ODYSSEY_E	TPSCR3_GGD	CONE
ORIH	г. Орехов (Запорожская обл.)	TPS GB-500	TPSCR3_GGD	CONE
PHML	г. Переяслав-Хмельницкий	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
RJNT	пгт. Рожнятов (Ивано-Франковская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
SIMF	г. Симферополь	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE; TPSD (c 13.09.2011 r.)
VASL	пгт. Васильковка (Днепропетровская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
VRDP	г. Верхнеднепровск (Днепропетровская обл.)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
VRHV	пгт. Верховина (Ивано-Франковская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	NONE
VSLE	пгт. Весёлое (Запорожская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
ZPRG	г. Запорожье	TPS GB-1000	TPSCR3_GGD	CONE



Рис. 3. Диаграмма наблюдений на ГНСС-станциях

• получение оценок координат для отдельного дня наблюдений;

• получение оценок координат для недели;

• получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

Подробнее схема обработки описана в работе [1], диаграммы получений суточных и недельных решений показаны на рис. 2 и 3 в работе [2].

В качестве исходных данных служили:

• наблюдения ГНСС-спутников, зафиксированные на перманентных станциях сети (в формате RINEX);

• комбинированые точные эфемериды ГНСС-спутников, предоставляемые IGS (в формате SP3);

• параметры вращения Земли, полученные IGS и согласующиеся с точными эфемеридами ГНСС-спутников;

• солнечно-лунные эфемериды DE200, предоставляемые Лабораторией реактивного движения (JPL);

• DCB-файлы, предоставляемые Центром определения орбит в Европе (CODE), содержащие оценки разностей кодовых наблюдений для каждого спутника;

• глобальная модель ионосферы, предоставляемая CODE.

Станция	<i>X</i> , м <i>Y</i> , м <i>Z</i> , м	Широта Долгота Высота, м	Станция	<i>X</i> , м <i>Y</i> , м <i>Z</i> , м	Широта Долгота Высота, м
BCRV	3568279.1915 2069742.5348 4848556.5367	49°47'56.573652" 30°06'55.520962" 215.5394	NMSH	3512101.9645 2035407.1179 4903425.2803	50°34'09.876446" 30°05'38.582977" 213.7265
BGSL	3558191.6813 2127363.6350 4831122.9384	49°33'24.372845" 30°52'27.350388" 220.5953	ORIH	3498158.4006 2520902.7852 4684212.1805	47°33'42.895133" 35°46'40.516215" 90.1583
CHRT	3773822.7546 1823739.7273 4791842.1164	49°00'52.739195" 25°47'33.528344" 284.3839	PHML	3498790.1817 2143181.4097 4867026.8625	50°03'28.303141" 31°29'22.281367" 134.8069
DIZU	3463259.2210 2431916.3165 4756188.1620	48°31'47.553347" 35°04'36.136033" 119.8705	RJNT	3830157.3290 1717771.5118 4786509.3324	48°56'24.921073" 24°09'20.020475" 413.9358
DNCK	3378275.6779 2621541.5966 4716841.9174	47°59'49.508405" 37°48'41.253730" 245.4846	SIMF	3740929.3762 2536824.3857 4485457.9415	44°58'22.454688" 34°08'32.088164" 338.5582
KIRV	3580644.7215 2257443.5310 4755337.2547	48°31'04.418299" 32°13'46.847341" 162.0081	VASL	3444688.8031 2503180.3165 4732794.6470	48°12'47.666362" 36°00'18.317074" 114.7511
KMST	3505800.8917 2066726.7518 4894884.8482	50°26'55.247621" 30°31'12.152915" 214.6071	VRDP	3486253.0402 2380263.3423 4765413.8475	48°39'20.065250" 34°19'24.878434" 93.8741
KRRG	3574076.8561 2356633.7513 4712152.9792	47°56'08.368253" 33°23'58.563209" 89.8677	VRHV	3871109.0077 1787573.3874 4728428.4873	48°08'54.379877" 24°47'10.373835" 703.3902
KZLE	3449803.3741 2082376.2324 4927625.9784	50°54'49.870791" 31°06'57.934593" 152.1926	VSLE	3570898.6426 2494321.7297 4643670.2546	47°01'26.884110" 34°56'05.380544" 103.9304
KZLS	3465825.1874 2325579.9485 4806876.6677	49°13'22.787448" 33°51'42.262123" 111.2026	ZPRG	3509633.5095 2459644.6785 4707985.2896	47°52'46.769228" 35°01'25.663059" 98.2011
NIKL	3697158.8762 2314682.9830 4637932.4525	46°56'54.059727" 32°02'58.120489" 117.0882	FRAN (GPS-неделя 1690, эпоха: 30 мая 2012 г. 12:00:00 время GPS)	3815148.3210 1755911.7252 4784539.5949	48°54'51.482334" 24°42'50.846138" 316.8461

Таблица 2. Координаты станций сети «TNT-TPI GNSS Network» для GPS-недели 1698 (система координат: IGS08, эпоха: 25 июля 2012 г. 12:00:00 время GPS)

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

Станция	<i>X</i> , м <i>Y</i> , м <i>Z</i> , м	Широта Долгота Высота, м	Станция	<i>X</i> , м <i>Y</i> , м <i>Z</i> , м	Широта Долгота Высота, м
BERZ	3725027.3694 2229185.6317 4657283.7340	47°12'15.703793" 30°53'51.957687" 73.5029	NKPL	3557707.9999 2435365.7111 4684639.1857	47°34'02.673670" 34°23'34.428382" 110.2541
KVDA	3501745.9208 2076988.1560 4893395.6427	50°25'41.325906" 30°40'24.319594" 170.0086	SHEV	3523606.8759 2151842.8458 4845424.6239	49 45'21.942959" 31°24'43.666654" 154.2941
MAGD	3443393.5287 2403366.5885 4784867.4517	48°55'14.297200" 34°54'49.229179" 137.3455	SKVR	3586943.0851 2045068.8678 4845326.8268	49°45'13.213564" 29°41'21.495529" 254.4540
MALN	3527322.0353 1974526.4471 4917238.8060	50°45'56.435147" 29°14'21.320925" 181.2847	SLVC	3418107.2278 2033545.6381 4969685.5606	51°31'01.276992" 30°44'59.355184" 184.5021
NIZH	3413641.3684 2123437.3514 4935250.5718	51°01'21.010418" 31°53'00.444209" 168.3639	VELM	3773429.3556 2165026.7796 4648637.4578	47°05'24.018017" 29°50'43.066968" 74.1873

Таблица 3. Координаты новых станций сети «System.NET» для GPS-недели 1706 (система координат: IGS08, эпоха: 19 сентября 2012 г. 12:00:00 время GPS)

Для задания системы координат использовалось ограничение «No-net translation» (отсутствие общего смещения) на координаты станций из списка IGS Reference Frame (ANKR, BOR1, BUCU, CRAO, GLSV, GRAZ, ISTA, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, POLV, RIGA, SOFI, UZHL, WTZR и ZECK). Априорные значания координат и скоростей этих станций были взя-

σ, MM 3 2 1 0 1630 1640 1650 1660 1670 1680 1690 1700 1710 GPS-неделя

Рис. 4. Изменения средней повторяемости значений составляющих координат ГНСС-станций

ты из каталога IGS08. Для остальных станций в качестве априорных использовались координаты из каталога IGS08 или из решения для предыдущей сессии (для станций, не включённых в каталог). Для новых станций априорные координаты брались из заголовков RINEX-файлов и уточнялись в процессе предварительной обработки.

В результате были получены суточные и недельные оценки координат станций сети, а также значения зенитной тропосферной рефракции для всех станций. Одной из главных целей данной обработки была оценка координат новых станций украинских коммерческих ГНСС-сетей. Координаты станций сети «TNT-TPI GNSS Network» для GPS-недели 1698 показаны в табл. 2. К сожалению, не было ни для одной недели, для которой были бы доступны наблюдения для всех станций этой сети. Поэтому координаты станции FRAN представлены для GPS-недели 1690. В табл. 3 показаны координаты новых станций сети «System.NET» для GPS-недели 1706. Все результаты (в формате SINEX) и их графические представления размещены в свободном доступе на ftp-сервере ГАО НАН Украины (ftp://ftp.mao. kiev.ua/pub/gnss/products/IGS08/).



Рис. 5. Средняя повторяемость значений составляющих координат ГНСС-станций

Полученные из-за большого количества уравнений, а следовательно, и большого количества степеней свободы, субмиллиметровые средние квадратичные отклонения оценок координат ГНСС-станций не могут служить объективным критерием точности решений. Хорошим показателем точности оценок координат являются повторяемости значений составляющих координат станций, как средние для каждой недели (рис. 4), так и средние для каждой станции (рис. 5). Из рис. 4 видно, что значения для горизонтальных составляющих координат меньше



Рис. 6. Средние значения остатков составляющих координат ГНСС-станций после преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями EPN

1.4 мм, значения для вертикальной составляющей меньше 3.5 мм. Таким образом, можно утверждать о высокой точности полученых оценок координат станций.

35 станций «базовой» сети входят в Европейскую перманентную ГНСС-сеть (кроме украинских станций СRAO, DNMU, KORP, PRYL и SURE), поэтому возможно сравнить решения, полученные в ГАО НАН Украины, с комбинированными решениями ЕРN. Полученные значения параметров преобразования Гельмерта между решениями изменяются в следующих пределах:

• сдвиг — от -25.0 до 26.4 мм;

• вращение — от -0.67 до 0.96 мсд;

• масштабный множитель — от $-0.7 \cdot 10^{-9}$ до $0.5 \cdot 10^{-9}$.

Значения углов вращения вокруг осей и масштабного множителя незначительны. Сеть EPN покрывает гораздо большую территорию, чем сеть ГАО НАН Украины, и для задания системы координат IGS08 используется гораздо больше референсных станций. Это различие в геометрии сетей естественно приводит к наличию сдвига точки начала отсчёта.

На рис. 6 показаны средние значения остатков составляющих координат общих станций после преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями EPN. Видно, что из общей картины выпадают значения остатков для станции «Менделеево» (MDVJ), находящейся на краю сети. Значения остатков для остальных станций находятся в пределах:

 для северной составляющей — от -0.89 до 1.75 мм;

для восточной составляющей — от -0.49 до 0.47 мм;

• для высотной составляющей — от -1.97 до 2.96 мм.

Таким образом, в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины из обработки наблюдений, выполненных на перманентных ГНССстанциях Украины и Восточной Европы, для GPS-недель 1632—1708 получены высокоточные оценки координат станций сети в системе координат IGS08, а также оценки зенитных тропосферных задержек для всех станций сети. Решения ГАО НАН Украины хорошо согласуются с комбинированными решениями Европейской перманентной ГНСС-сети.

Работа частично выполнена в рамках научного задания «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» (2012 г.) в рамках Целевой комплексной программы научных космических исследований НАН Украины на 2012—2016 гг.

- 1. *Хода О. А.* Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS vs GPS+ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія. 2011. **17**, № 6. С. 45—53.
- 2. *Хода О. А.* Обработка эталонной тестовой кампании EPN в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космічна наука і технологія. 2012. **18**, № 4. С. 59—65.
- 3. *Хода О. А.* Центр анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины: результаты обработки наблюдений для GPSнедель 1400—1631 // Космічна наука і технологія. — 2015. — **21**, № 2. — С. 56—64.
- Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame // J. Geodesy. 2011. 85, N 8. P. 457–473.
- Bernese GPS Software Version 5.0 / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
- *Rebischung P., Griffiths J., Ray J., et al.* IGS08: the IGS realization of ITRF2008 // GPS Solutions. 2012. 16, N 4. P. 483–494.
- Schmid R. IGS phase center model igs08.atx Current status and future improvements [Электронный ресурс] // Presented at TUM Colloquium Satellite Navigation. — Munich, 2011. — Режим доступа: http://acc.igs.org/antennas/igs08-atx-status_TUM11. pdf
- Schmid R., Gendt G., Steigenberger P., et al. Generation of igs05.atx — status quo [Электронный pecypc] // Presented at IGS Workshop 2006 «The International GNSS Service (IGS): Perspectives and Visions for 2010 and beyond». — Darmstadt, 2006. — Режим доступа: ftp:// igscb.jpl.nasa. gov/pub/resource/pubs/06_darmstadt/ IGS%20Presentations%20PDF/10_2_Schmid. pdf

Стаття надійшла до редакції 23.01.15

О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ СХІДНОЄВРОПЕЙСЬКИХ ПЕРМАНЕНТНИХ ГНСС-СТАНЦІЙ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 1632—1708

У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було оброблено спостереження ГНСС-супутників на перманентних станціях, розташованих в Україні та в Східній Європі, для GPS-тижнів 1632—1708. Обробку було виконано за допомогою комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0». В результаті отримано оцінки координат ГНСС-станцій у системі координат IGS08 та оцінки зенітних тропосферних затримок для всіх станцій, у тому числі і для нових станцій українських комерційних ГНСС-мереж «TNT-TPI GNSS Network» і «System.NET». Отримані розв'язки відповідають по якості комбінованим розв'язкам Європейської перманентної ГНСС-мережі.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), Міжнародна земна система координат (ITRF), IGS08, координати станцій, зенітні тропосферні затримки.

O. A. Khoda

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

ESTIMATION OF COORDINATES OF THE EASTERN EUROPEAN PERMANENT GNSS STATIONS USING OBSERVATION DATA FOR GPS WEEKS 1632–1708

Observations of GNSS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe for GPS weeks 1632–1708 were processed in GNSS Data Analysis Centre of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine. The processing was carried out with Bernese GPS Software ver. 5.0. As a result, the estimation of stations coordinates in the IGS08 reference frame and the estimation of zenith tropospheric delays for all stations (including new stations of the Ukrainian commercial networks TNT-TPI GNSS Network and System. NET) are defined. The obtained solutions are in a good agreement with the combined solutions of the EUREF Permanent GNSS Network.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), International Terrestrial Reference Frame (ITRF), IGS08, stations coordinates, zenith tropospheric delays. УДК 551.510; 533.93

Л. В. Козак¹, Р. І. Костик², О. К. Черемних³, А. С. Прохоренков¹

1 Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

² Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

³ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

і Державного космічного агентства України, Київ

ПРОЯВИ ПРОЦЕСІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ ПЛАЗМИ В АТМОСФЕРІ СОНЦЯ ТА НАВКОЛОЗЕМНОМУ ПРОСТОРІ

Проведено дослідження властивостей турбулентних процесів у плазмі сонячної фотосфери, сонячному вітрі та перехідних областях магнітосфери Землі. Для аналізу використані наземні спостереження флуктуацій конвективної складової швидкості в активних і спокійних областях сонячної фотосфери, отримані на 70-см німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT в Ізаньї (о. Тенериф, Іспанія), та супутникові виміри флуктуацій магнітного поля, отримані космічним апаратом C3 місії «Кластер-2» (дані представлені з часовою дискретністю 22.5 Гц). Для визначення характеристик турбулентних процесів на різних масштабах проведено аналіз моментів функції розподілу флуктуацій швидкості та магнітного поля, спектральний розгляд та вейвлет-аналіз. Отримані залежності порівнювалися з наявними на сьогодення моделями як однорідних так і неоднорідних турбулентних процесів. Крім різних типів турбулентних процесів в проаналізованих областях відмічається можливість реалізації самоорганізованих магнітних плазмових структур в активних областях сонячної фотосфери та багатомасштабний характер динаміки магнітосфери. Магнітосфера веде себе як самоорганізована система з різними характерними масштабами. При цьому, за наявності різких стрибків параметрів в перехідних областях магнітосфери Землі спостерігається поява зворотних каскадних процесів.

Ключові слова: турбулентні процеси, перехідні області магнітосфери Землі, плазма сонячного вітру, зворотні каскадні процеси в магнітосфері Землі, самоорганізація магнітних плазмових структур.

вступ

Всі об'єкти Сонячної системи пов'язані між собою процесами, відповідальними за перенесення маси, імпульсу і енергії від Сонця за допомогою сонячного вітру. Саме сонячний вітер є основним агентом, за допомогою якого активні процеси на Сонці впливають на стан навколоземного простору і магнітосфери Землі [10]. Дотепер плазмово-хвильові взаємодії розглядалися в основному в найпростіших однорідних середовищах з додаванням слабкої неоднорідності у вигляді поправок або послідовних наближень. Досліджувати ж сильну неоднорідність вдавалося лише в окремих випадках. Так що розпочаті нами роботи комплексного аналізу турбулентних процесів в атмосфері Сонця, плазмі сонячного вітру та перехідних областях магнітосфери є надзвичайно актуальними. При цьому сукупність нестаціонарних процесів на Сонці можна розглядати як когерентні плазмові процеси з ієрархічними масштабами, в яких відбуваються глобальні процеси перетворення енергії Сонця в енергію плазмових потоків і електромагнітного випромінювання [16].

Перші результати аналізу конвективних процесів в активних областях фотосфери Сонця

[©] Л. В. КОЗАК, Р. І. КОСТИК, О. К. ЧЕРЕМНИХ,

А. С. ПРОХОРЕНКОВ, 2015

показали взаємозв'язок між середнім магнітним полем і спостережуваними великомасштабними магнітними структурами на Сонці [5]. Це може суттєво змінити уявлення про механізми самоорганізації в космічній плазмі, оскільки сучасна концепція середнього турбулентного магнітного поля Сонця, яка зазвичай використовується в теорії динамо, нічого не говорить про такі спостережувані структури, як факели, плями та ін. [9].

Однією з найважливіших проблем продовжує залишатися проблема розігріву сонячної корони. Серед передбачуваних механізмів нагрівання розглядається генерація і дисипація хвиль. Друга можливість пов'язана з дисипацією енергії у так званих мікро і наноспалахах. Основні питання, на які має дати відповідь теорія нагрівання, це питання вихідного джерела енергії, механізму трансформації цієї енергії в теплову енергію корональної плазми і питання про просторові і часові масштаби розглянутих явищ. Аналізуючи хвильовий механізм нагрівання, традиційно прийнято вважати, що джерело хвильової енергії є великомасштабним. Це припущення видається природним, оскільки структура макроскопічних рухів містить гранули та супергранули, і енерговміст у таких рухах настільки великий, що малої частки цієї енергії більш, ніж достатньо, щоб нагріти розріджену плазму сонячної корони. Однак масштаби хвильових рухів і передбачувані масштаби хвиль, здатних ефективно обмінюватися енергією з частками, відрізняються на багато порядків. В результаті для передачі хвильової енергії будуються моделі каскаду енергії, де великомасштабні хвильові рухи породжують більш дрібномасштабні, і тому енергія, яка доходить до масштабів ефективної взаємодії хвиль і частинок, становить малу частку вихідної енергії макроскопічних рухів. При цьому використовуються класичні уявлення про гідродинамічну турбулентність, в якій область «джерела» відділена від області «дисипації», і каскад визначається потоком енергії по спектру при відсутності процесів проміжної дисипації або накачування енергії у проміжних шкалах. Ці класичні уявлення, розвинені для однорідної гідродинамічної моделі, не враховують специфіки задачі, в якій макроскопічні процеси відбуваються в газі фотосфери, а нагрівання відбувається у повністю іонізованій короні (де, крім того, наявні у значній кількості багаторазово іонізовані іони). Подальший розвиток опису процесів енергообміну в сонячній короні, очевидно, лежить в області доповнення та суміщення теоретичних підходів, розвинутих у моделях з урахуванням сильної неоднорідності плазми. При цьому досить активно розглядається можливість нагрівання середовища неоднорідними турбулентними процесами [9].

Отже, незважаючи на піввіковий досвід досліджень і безліч отриманих важливих результатів, задовільної теорії МГД-турбулентності поки що немає. Дійсно, навіть у найпростіших випадках залишаються не до кінця зрозумілі моменти. Яким чином турбулентність посилюється, підтримується і визначає форму магнітних полів? Яка структура і спектр цих полів на різних масштабах? (Завдяки цьому проблема турбулентності безпосередньо пов'язана з фундаментальною проблемою генерації магнітного поля). Як енергія передається між каскадами і дисипує? (Наприклад, незрозуміло, чи обумовлено нагрівання плазми у акреційних дисках і сонячній короні турбулентними процесами). Яким чином турбулентний потік і магнітне поле підсилюють або стримують перенесення тепла?

I це далеко не повний перелік запитань, які виникають у зв'язку з аналізомі космічної і лабораторної плазми.

Розвинута турбулентність характеризується великою кількістю ступенів вільності і нелінійно взаємодіючих мод, багатомасштабною структурою і випадковими пульсаціями швидкостей і полів. Тому для опису турбулентного середовища найкраще підходять методи статистичної фізики і теорії ймовірності. Для того щоб описати випадковий процес, необхідно знати функцію розподілу амплітуд флуктуацій МГД-параметрів.

Функція розподілу таких процесів не завжди описується відомими математичними функціями і рядами, а для багатьох типів випадкових процесів відомий лише спосіб апроксимації функцій розподілу.

Найчастіше розподіл ймовірностей амплітуд флуктуацій задовольняє гауссовий закон роз-

поділу. Гауссову статистику задовольняє, наприклад, класичний броунівський рух. У теорії ймовірності відомі і інші закони розподілу ймовірності, здатні описати випадкові процеси з дальніми кореляціями. Статистичний опис пов'язаний з деякою процедурою огрублення інформації та призводить до скорочення числа змінних в задачі. При цьому втрачається значна частка інформації про стан окремих частинок (або хвиль), але зберігається достатньо інформації про макроскопічний характер руху та ймовірний розподіл по станах системи. Тому для опису турбулентності необхідно застосовувати спеціальні методи і підходи.

Оскільки для фізичних застосувань важливі властивості нелінійності, неоднорідності і анізотропії турбулентного процесу, то досліджуються моменти функції розподілу, що дозволяє наближено описати більшість основних ефектів.

ВИКОРИСТАНІ МЕТОЛИ ТА ПІЛХОЛИ

Аналіз моментів функції розподілу. При аналізі флуктуацій МГД-параметрів X(t) момент функції розподілу (структурна функція) S_a порядку q визначається на масштабі τ як статистичне середнє по ансамблю співвідношень $\delta_X = X(t + t)$ $(+\tau) - X(t), S_{q}(\tau) = \langle |\delta_{\tau}X|^{q} \rangle$. В теорії Колмогорова розглядаються структурні функції (моменти) для різниці швидкостей на просторовому масштабі *l*, $\delta_{l}\upsilon = \upsilon(x+l) - \upsilon(x), \ S_{a}(l) \equiv \langle |\delta_{l}\upsilon|^{q} \rangle.$

Дослідження структурних функцій еквівалентне дослідженню функції розподілу турбулентних флуктуацій. З практичної точки зору дослідити структурні функції простіше, у більшості випадків їх можна вимірювати в експерименті. Метод структурних функцій дозволяє детально описати неоднорідність розподілу на різних масштабах процесу. Для ізотропної розвиненої турбулентності Колмогоров розглянув турбулентний каскад і припустив, що в інерційному інтервалі $\eta \ll l \ll L$ (η — дисипативний, а *L* — глобальний масштаб) при великих числах Рейнольдса всі статистично усереднені моменти S_a(l) поля швидкостей и на масштабі l залежать лише від середньої швидкості дисипації є, і даного масштаба l (властивість локальності). Ця теорія А. Н. Колмогорова була названа К41 [8]. В інерційному діапазоні теорія К41 припускає статистичну квазірівновагу флуктуацій і гауссову статистику пульсацій швидкостей. Динаміка інерційного діапазону не залежить від способу генерації турбулентності і визначається інваріантом потоку енергії через цей інтервал: середній потік енергії зберігається.

Це призводить до того, що вираз для структурної функції (статистичних середніх) пов'язаний з просторовим масштабом степеневою залежністю [2, 8]:

 $S_q(l) \sim \langle |\delta_l \upsilon|^q \rangle \equiv \langle |\upsilon(x+l) - \upsilon(x)|^q \rangle \sim l^{\zeta(q)}.$ Із міркувань розмірності А. Н. Колмогоров вивів знаменитий степеневий закон для спектру потоку енергії $E_k \sim k^{-5/3}$ (закон «п'яти третіх») для розвиненої ізотропної турбулентності в інерційному діапазоні). В моделі К41 показник степеня структурних функцій лінійний $\zeta(q) = q/3$, що відображає факт однорідності турбулентних процесів. Для неоднорідних турбулентних процесів структурні функції високих порядків мають нелінійну залежність $\zeta(q)$ від порядку q, що відображає факт відхилення PDF від гауссового закону функції розподілу ймовірностей флуктуацій PDF (probability distribution function).

У моделі Колмогорова К41 в інерційному інтервалі закладено чотири припущення: однорідність (немає особливих точок), масштабна інваріантність (немає особливих масштабів), ізотропія (немає особливих напрямів) і локальність взаємодій (взаємодії між порівнянними масштабами домінують). Локальний характер турбулентності в інерційному інтервалі призводить до того, що зміна енергії на даному масштабі визначається взаємодією тільки вихорів, які мають близькі значення хвильових чисел і тривалий час (більший, ніж час «обертання» вихору). Взаємодія вихорів з сильно різними розмірами мала.

Наявність магнітних полів у міжпланетному середовищі може викликати сильну анізотропію динамічних процесів у плазмі. Спробою адаптувати модель К41 до замагніченого середовища є двовимірна модель Ірошникова — Крейчнана (IK) [18, 19]. В рамках цього розгляду турбулентні збурення є малими по амплітуді і схожі на хвильові збурення, що поширюються уздовж середнього поля (альвенівська турбулентність).

Спектр енергії для моделі IK задається співвідношенням $E_{\rm IK}(k) = \langle |\delta \upsilon(k)|^2 \rangle k^2 \propto k^{-3/2}$. При цьому у порівнянні з колмогорівським спектром значно зменшується рівень передачі енергії на малих масштабах, і зростає час передачі енергії. Залежність для структурних функцій в моделі IK: $S_a(l) \sim l^{a/4}$.

У підході Крейчнана перебільшується вплив великомасштабних флуктуацій на еволюцію дрібномасштабних неоднорідностей: цей вплив зводиться до перенесення дрібномасштабних флуктуацій з малою їхньою деформацією (адіабатичне наближення) [4]. Незважаючи на недоліки, модель ІК широко використовується в багатьох роботах (наприклад, для інтерпретації властивостей турбулентності міжпланетної плазми, плазми в токамаках тощо).

Для аналізу моментів функції розподілу визначальним є наявність властивості розширеної самоподібності ESS. Дане явище було виявлене експериментально при дослідженні дрібномасштабної гідродинамічної турбулентності в аеродинамічній трубі [11]. При відносно низьких значеннях чисел Рейнольдса, коли в звичайному представленні $S_q(l) \sim l^{\varsigma(q)}$ інерційний інтервал не виявляється, спостерігається залежність

$S_q(l) \sim S_{\mathfrak{Z}}(l)^{\zeta(q)/\zeta(\mathfrak{Z})}$

для розширеного діапазону масштабів $l \ge 5\eta$, η — колмогорівський масштаб дисипації. Така властивість (її ще називають самоподібністю) спостерігається майже до масштабів дисипації.

Це феноменологічне спостереження призвело до вироблення критерію узагальненої самподібності для довільної пари структурних функцій

$$S_{q}(l) \simeq S_{p}(l)^{\zeta(q)/\zeta(p)}.$$

Передбачається, що така самоподібність є проявом прихованих статистичних симетрій.

Використовуючи властивість розширеної самоподібності можна знайти з досить хорошою точністю значення $\zeta(q)$ і оцінити тип турбулентних процесів. При цьому нелінійна функціональна залежність $\zeta(q)$ від порядку моменту qдля експериментальних даних, як і вказувалося вище, є наслідком переміжності процесів. Для інтерпретації нелінійного спектра $\zeta(q)$ застосовують логпуассонівські моделі турбулентності, в яких показник степеня структурної функції визначається співвідношенням [6, 14, 21]:

$$\zeta(q) = (1 - \Delta) \frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1 - \beta} [1 - \beta^{q/3}],$$

де β і Δ — параметри, які характеризують переміжність процесу і вигляд дисипативних структур відповідно. Важливо, що в рамках даної моделі розглядається стохастичний мультиплікативний каскад, і логарифм енергії дисипації описується пуассонівським розподілом. Для ізотропної тривимірної турбулентності Ше і Левек (ШЛ) запропонували $\Delta = \beta = 2/3$ [21].

Слід зробити зауваження про практичне застосування лог-пуассонівських моделей для інтерпретації експериментальних даних. Перевагою лог-пуассонівської моделі є врахування впливу дисипативного діапазону, коли крайові ефекти відіграють істотну роль в системі з відносно невеликим числом Рейнольдса і спостерігається обмежений інерційний діапазон. Властивість узагальненої самоподібності враховує крайові ефекти: масштабна інваріантність формується не в нескінченному просторі, а на кінцевому інтервалі масштабів. Це природним чином дозволяє аналізувати ефекти в'язкості (дисипації) і властивості дисипативних структур, зокрема, їхню розмірність. Наприклад, в лог-пуасонівській моделі ізотропної тривимірної гідродинамічної турбулентності передбачається, що за дисипацію відповідають одновимірні ниткоподібні структури. В лог-пуасонівській моделі з урахуванням двовимірної емпірики моделі Ірошникова — Крейчнана передбачається двовимірність дисипативних структур [3, 12]. Якщо ж середовище характеризується складною геометрією дисипативних структур або одночасно наявні структури з різною розмірністю, то процес можна характеризувати значеннями підгонки Δ і β .

Спектральний аналіз. Турбулентні процеси характеризуються системою з ієрархією вихорів, в якій відбувається каскад по енергії від великих масштабів, порівняних із розміром джерела, через інерційний інтервал, до малих дисипативних масштабів. Найбільш грубою характеристикою турбулентного середовища є спектральний індекс, що характеризує зміну спектральної густини потужності в інерційному інтервалі. Інерційний інтервал зі степеневим спектром обмежений низькими частотами, пов'язаними з великомасштабними джерелами енергії, і частотами, які відповідають дрібномасштабним дисипативним (кінетичним) процесам. Динаміка інерційного інтервалу не залежить від механізму збудження турбулентності, а визначається інваріантом потоку енергії через цей інтервал.

Основним припущенням при статистичному (мультифрактальному) аналізі є те, що сигнал, який ми розглядаємо, вважається стаціонарним, тобто характерні часи не змінюються у межах розглянутого інтервалу. Однак для дуже динамічної ситуації нестаціонарність сигналу не може бути виключена. У цій ситуації проводять вейвлет-аналіз для розкладу сигналу в часовому і частотному діапазоні, що дозволяє побачити зміну в часі спектральних властивостей сигналу. При цьому аналізуючий вейвлет (материнський вейвлет) задовольняє чотири вимоги: допустимість (нульове середнє значення), подібність (всі функції сімейства отримуються із аналізуючого вейвлету шляхом масштабного перетворення), зворотність та регулярність (функція повинна бути добре локалізована і у фізичному просторі, і у просторі Φ ур'є).

Материнський вейвлет, використаний в роботі, задовольняє умову y(t) = y((t-b)/a), де a > 0 — масштабний фактор (розтягнення) функції, b — параметр, що характеризує зсув материнського вейвлету. Коефіцієнт масштабування прямо пов'язаний з частотою. Коефіцієнти для неперервного вейвлет-перетворення, яке використовувалось, мають вигляд [1, 15]:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) y\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Використаний материнський вейвлет є гауссовим вейвлетом Морле:

$$y(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \left[\exp\left(-i2\pi f_0 t\right) - \exp\left(-2\pi^2 \sigma^2 f_0^2\right) \right] \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right),$$

де *f*₀ — параметр частоти, яка дозволяє змістити частотний діапазон для дослідження, σ — ширина гауссової обвідної.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

Наземні спостереження. Для аналізу характеристик процесів у сонячній фотосфері були використані дані спостережень на 70-см німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT в Ізаньї (о. Тенериф, Іспанія) [20]. Спостереження спокійної області були проведені 21 липня 2004 р., а спостереження активної області (факел) — 13 листопада 2007 р.

Методика отримання і опрацювання даних для різних областей дещо відрізняється.

Для спокійної області за допомогою вузькосмугових фільтрів у лінії водню Н_а і в лінії іонізованого кальцію Са II К була вибрана незбурена ділянка поблизу центра сонячного диску. Як реєструвальний пристрій використовувалася ПЗС-камера 1024 × 1024 пкл. Просторова роздільна здатність (номінальна) одного пікселя становила 0.087" на сонячній поверхні. Протяжність області в напрямку дисперсії, яку реєструвала матриця, становила 0.41 пм. Вхідна щілина спектрографа на поверхні сонячного диска вирізала область розмірами 0.46 × 89". Реєстрація спектру відбувалася в одному і тому ж місці сонячного диска протягом 70 хв з інтервалом 7 с. Тривалість однієї експозиції дорівнювала 1 с, а їхнє загальне число склало 600. За час спостережень тремтіння сонячної поверхні на вхідній щілині спектрографа, обумовлене нестабільністю земної атмосфери, становило 0.3-0.7".

Спостереження для активної області проводилися в трьох ділянках довжин хвиль: Fe I $\lambda\lambda$ 1564.3—1565.8 нм, Ba II λ 455.4 нм, Ca II λ 396.8 нм. За фільтрограмою в лінії Ca II λ 396.8 нм була вибрана активна область (факел) поблизу центра сонячного диска. Процесом спостережень керувала TIP-камера (інфрачервоний спектрополяриметр), вхідна щілина якої сканувала ділянку поверхні Сонця розмірами 84 × 5.3". В одній серії робилося 15 сканів, потім щілина поверталася в початкове положення.

Тривалість одного скану становила 27.3 с, протягом якого реєструвалися всі чотири параметри Стокса, тривалість серії — 6 хв 50 с. Всього було проведено 22 серії спостережень. Реєстрація велася на ПЗС-матриці розмірами 452 × 1009 пкл.



Рис. 1. Флуктуації конвективної складової поля швидкостей у сонячній фотосфері (*h* = 650 км): *a* — для спокійної області (дискретність вимірів 0.087"), *б* — для активної області (дискретність вимірів 0.185")

Таким чином, просторове розділення становило 0.185", а спектральне — 1.473 пм.

Лінія Ва II реєструвалася вузькосмуговим фільтром (TESOS-камера) в неперервному спектрі у 37 довжинах хвиль на ПЗС-камеру розміром 512 × 512 пкл. При пересуванні TIPщілини область, що реєструється, не виходила за межі зору TESOS-камери, а тільки зміщувалася на 0.35", тобто, протягом всього часу спостережень в полі зору камери перебувала одна і та ж ділянка поверхні Сонця. Просторова роздільна здатність становила 0.089", спектральна — 1.6 пм, а часова — 25.6 с. ПЗС-матриця вирізала на поверхні Сонця ділянку розмірами 45.6 × 45.6".

На третій камері реєстрація велася лише в центрі лінії Са II λ 396.8 нм на ПЗС-матрицю розмірами 900 × 900 пкл. Просторова роздільна здатність — 0.123", а часова — 4.93 с.

Під час спостережень тремтіння зображення на вхідній щілині спектрографа, обумовлене нестабільністю земної атмосфери, перебувало у межах 0.4—0.6".

Подальша обробка отриманих даних аналогічна для різних областей фотосфери. Всі зображення були виправлені за темновий струм, коливання прозорості земної атмосфери і неоднакову чутливість пікселів ПЗЗ-камер. Далі знаходилися значення швидкості в центрі (висота утворення в атмосфері Сонця h = 650 км) і в далеких крилах (h = 0 км) лінії Ва II. Для цієї мети використовувалася методика «лямбда-метр» [22]. Для кожного моменту часу і для кожної спектральної доріжки уздовж щілини спектрографа були знайдені значення швидкості V(h, t, x), а також їхні усереднені за часом і простором значення <*V*(*h*)>. Потім були визначені флуктуації швидкості в центрі і крилах досліджуваної лінії: $\delta V(h,$ $t, x) = V(h, t, x) - \langle V(h) \rangle.$

Флуктуації параметрів δV обумовлені в основному конвективними і хвильовими рухами. Для поділу на грануляційну і хвильову складові поля швидкостей була побудована діагностична k- ω діаграма, тобто залежність потужності варіацій δV від часової (ω) і просторової (k) частот [17].



Рис. 2. Значення магнітного поля, отримані при русі космічного апарата С3 місії «Кластер-2» із плазми сонячного вітру в область магнітошару

Надалі ми використовували лише конвективну складову поля швидкостей. Розміри конвективних елементів знаходилися за зміною знаку швидкості $\delta V(h, t, x)$ уздовж щілини спектрографа.

Флуктуації конвективної складової швидкості для спокійної та активної області сонячної фотосфери показано на рис. 1.

Супутникові спостереження. Для аналізу характеристик сонячного вітру на орбіті Землі та розгляду властивостей плазмового потоку в найбільш збуреній області магнітосфери — магнітошарі — проведено відбір фізично однорідних вимірів ферозондових магнітометрів космічного апарата С3 місії «Кластер-2» з частотою опитування 22.5 Гц. Слід відмітити, що для проведення коректного аналізу флуктуацій магнітного поля, особливо на малих масштабах і для областей проходження магнітосферних приграничних шарів, наявність експериментальних даних із високою частотою опитування є особливо актуальним.

Розглянуті зміни флуктуацій магнітного поля при русі космічного апарата із плазми сонячного вітру в область магнітошару приведено на рис. 2.

Із рисунків добре видно, що флуктуації у магнітошарі суттєво відрізняються від незбуреного сонячного вітру насамперед набагато вищою мінливістю параметрів плазми (магнітного поля). Безпосередньо виміряні значення як модуля магнітного поля *B*, так і його складових вельми сильно флуктуюють біля своїх середніх значень. При цьому відносні варіації поля (відхилення параметра на деякому інтервалі, віднесене до його середнього значення на цьому інтервалі) у магнітошарі мають значно більш широкий розподіл, а їх середні значення перевищують значення в сонячному вітрі приблизно у 2-3 рази.

При цьому можна виділити:

• у плазмі сонячного вітру (СВ) дисперсія варіацій, нормована на поточне середнє значення, складає $\delta B/B = 0.05 \dots 0.25$ (для події 2009/03/30 виміри по суті сумірні з похибкою магнітометрів (0.1 нТл);

• у форшоковій області (ФШ) рівень флуктуацій δ*B*_ν/*B* = 0.3...0.4, δ*B*/*B* = 0.2...0.3;

• після перетину ударної хвилі (УХ) у постшоковій області (ПШ) рівень флуктуацій зростає у декілька разів в порівнянні з форшоком і відповідає значенням — $\delta B_y/B \approx \delta B/B \approx 0.5$;

• в глибині магнітошару (МШ) рівень флуктуацій спадає до $\delta B/B \approx 0.3$.

Максимальний рівень флуктуацій відповідає моменту входження супутника із плазми сонячного вітру у магнітошар.

Таким чином, характер турбулентного потоку плазми у МШ не пов'язаний безпосередньо з
турбулентністю у CB, і значною мірою є проявом власних процесів у МШ.

Також важливим фактом є те, що навіть при майже повній відсутності в сонячному вітрі флуктуацій магнітного поля у магнітошарі є варіації, які мають високий рівень збурень.

СТАТИСТИЧНИЙ ТА СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФЛУКТУАЦІЙ ШВИДКОСТІ В СОНЯЧНІЙ ФОТОСФЕРІ

Для дослідження особливостей функції густини ймовірності флуктуацій швидкості вибирався зсув у просторі, кратний дискретності вимірів (для спокійної області — 0.087", а для активної області — 0.185"). Аналізувалися статистичні властивості абсолютного значення варіацій швидкості dV = V(x+l) - V(x) в різних областях сонячної фотосфери на різних просторових масштабах. Зважаючи на результати представлені в роботі [16], експериментальні залежності структурних функцій (моментів функції густини ймовірності) різних порядків порівнювалися із моделями Колмогорова та Ірошникова — Крейчнана. При аналізі структурна функція визначалася співвідношенням

$$S_q(l) = \left\langle \left| V(x+l) - V(x) \right|^q \right\rangle \sim l^{\zeta(q)},$$

де кутовими дужками позначено усереднення експериментальних даних по ансамблю.

Зважаючи на матеріал, викладений вище при розгляді експериментальних даних, нормованих на скейлінг (показник степеня) для третього моменту ($\zeta(q)/\zeta(3)$), будемо мати порівняння експериментальних даних із колмогорівською моделлю турбулентності К41, для якої $\zeta(3) = 3/3 = 1$. Для порівняння ж експериментальних значень із моделлю двовимірної турбулентності Ірошникова — Крейчнана розглядалися залежності $\zeta(q)/\zeta(4)$. Крім того, оскільки характеристики середовища можуть змінюватися на різних просторових масштабах [16], то окремо проводився аналіз на масштабах до 3000 км і більше 3000 км.

Результати проведеного ESS-аналізу подано на рис. 3. Із рисунків видно, що спостережні флуктуації швидкості у спокійних областях сонячної фотосфері характеризуються ізотропністю турбулентних процесів і близькі до моделі Колмо-



Рис. 3: a — відношення $\zeta(q)/\zeta(3)$ для конвективної складової швидкості в спокійній області фотосфери на всьому наявному діапазоні даних (суцільна лінія — модель Колмогорова q/3); δ — відношення $\zeta(q)/\zeta(3)$ для конвективної складової швидкості в активній області фотосфери на масштабах до 3000 км (суцільна лінія — модель Колмогорова q/3); e — відношення $\zeta(q)/\zeta(4)$ для конвективної складової швидкості в активній області фотосфери на масштабах понад 3000 км (суцільна лінія — модель Ірошникова — Крейчнана q/4)

горова на всьому проаналізованому масштабі досліджень. Для активної області спостерігається зміна характеристик турбулентності на масштабах приблизно 3000 км; на менших масштабах



Рис. 4. Розподіл спектральної густини конвективної складової швидкості на різних висотах фотосфери: a — для спокійної області, δ — для активної області (1 — 650 км, 2 — 0 км)

близька до колмогорівської, а на великих масштабах — до моделі Ірошникова — Крейчнана.

Для перевірки результатів статистичного аналізу було проведено спектральний аналіз флуктуацій швидкості у активній та спокійній області фотосфери. Результати спектрального аналізу подано на рис. 4.

Можна відмітити, що для активної області сонячної фотосфери, як і в результаті статистичного аналізу, характер турбулентних процесів різний для різних масштабів: на масштабах до 3000 км домінують турбулентні процеси, які можна описати в рамках моделі Колмогорова $(k^{-5/3})$, а на великих масштабах має місце анізотропія турбулентних процесів, обумовлена ненульовим середнім магнітним полем (модель Ірошникова — Крейчнана $(k^{-3/2})$).

Масштаб 3000 км відповідає масштабу мезогрануляції і свідчить про ненульові середні магнітні поля в активних областях фотосфери. Отримані результати вказують на можливість реалізації самоорганізованих магнітних плазмових структур, таких як плями, біполярні групи та ін.

Для спокійної області сонячної фотосфери результати спектрального аналізу також підтверджують залежності, отримані в рамках статистичного підходу, і вказують на нульове середнє магнітне поле для спокійних областей фотосфери Сонця.

СТАТИСТИЧНИЙ ТА СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФЛУКТУАЦІЙ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ПЛАЗМІ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ОБЛАСТІ МАГНІТОШАРУ

Для визначення типу турбулентних процесів, що спостерігаються у плазмі сонячного вітру та магнітошарі Землі, аналізувались особливості структурних функцій (моментів функції густини ймовірності) різних порядків q відповідно до часового інтервалу τ для ряду даних B(t). Хороша



Рис. 5. Демонстрація розширеної самоподібності (ESSаналіз) для визначення скейлінгу структурної функції

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4



Рис. 6. Відношення ζ(q)/ζ(3): *a* — для 17 лютого 2010 р., *б* — для 30 березня 2009 р. Суцільна лінія — модель Колмогорова; штрихова — ізотропна логпуасонівська каскадна модель; точки — експериментальні дані по флуктуаціях магнітного поля для плазми сонячного вітру; квадратики — експериментальні дані області форшоку; хрестики — експериментальні дані для магнітошару; темні ромбики — експериментальні дані для постшокової області

дискретність вимірів дозволила охарактеризувати властивості неоднорідності на малих масштабах процесу. При цьому структурна функція визначалася співвідношенням [7, 13]

$$S_{q}(\tau) = \left\langle \left| B(t+\tau) - B(t) \right|^{q} \right\rangle \sim \tau^{\zeta(q)},$$

де кутовими дужками позначено усереднення експериментальних даних за часом.

Зважаючи на суттєвий рівень флуктуацій магнітного поля і наявність границь потоку, аналіз розширеної самоподібності проводився не тільки шляхом порівняння із однорідними моделями турбулентних процесів (K41 i IK), а і з лог-пуасонівською моделлю турбулентності, якою в залежності від значень параметрів що характеризують переміжність β та вигляд дисипативних структур Δ , можна описати різні типи наявних турбулентних процесів. При цьому для лог-пуассонівської ізотропної турбулентної каскадної 3D-моделі (лог-пуасонівська модель з параметрами Ше і Левека) маємо залежність

$$\zeta(q) = \frac{q}{9} + 2 \left[1 - \left(\frac{2}{3}\right)^{q/3} \right]$$

На практиці властивість узагальненої самоподібності дозволяє підвищити точність визначення $\zeta(q)$ при аналізі експериментальних даних. Скейлінг структурної функції, нормований на скейлінг для третього моменту ($\zeta(q)/\zeta(3)$) отримують із нахилу графіка в логарифмічному масштабі (рис. 5) (порівняння експериментальних даних із колмогорівською моделлю турбулентності К41). Із графіка видно, що степенева залежність типу $S_{a}(\tau) \sim \tau^{\zeta(q)}$ (тобто самоподібність — лінійна залежність) спостерігається на обмеженому інтервалі часових масштабів. Цей інтервал відповідає інерційному діапазону, що розглядається у класичних моделях ізотропної розвиненої турбулентності (К41 та ін.). У магнітошарі такий інтервал спостерігається на масштабах порядку 1 с — значення близьке до іонноциклотронної частоти для розглянутих супутникових вимірів. Для плазми сонячного вітру лінійна залежність спостерігається майже на всьому проаналізованому інтервалі часових масштабів (10 с). Отже, інерційний діапазон у перехідних областях магнітосфери Землі на порядок менший, ніж інерційний діапазон для плазми сонячного вітру.



Рис. 7. Відношення експоненціального значення структурної функції *q*-го порядку до четвертого порядку: *a* — для 17 лютого 2010 р., *б* — для 30 березня 2009 р. Суцільна лінія — модель Ірошникова — Крейчнана; точки — експериментальні дані по флуктуаціях магнітного поля для плазми сонячного вітру; темні ромбики — експериментальні дані області форшоку, хрестики — експериментальні дані для магнітошару; квадратики — експериментальні дані для постшокової області



Рис. 8. Спектри модуля магнітного поля: a - для плаз $ми сонячного вітру, <math>\delta - для$ області магнітошару. Лінійна апроксимація розрахована в діапазоні від 10 до 1 Гц (низькочастотна ділянка) і в діапазоні від 10^{2.5} до 10^{0.7} Гц (високочастотна ділянка)

Зважаючи на це, а також на наявність даних з високою дискретністю вимірів, вдалося провести ESS-аналіз для розгляду властивостей турбулентних процесів на малих масштабах — до 1 с (зазвичай дискретність навіть супутникових вимірів не дозволяє провести подібний аналіз).

Результати розрахунку скейлінгів моментів функції густини ймовірності для різних порядків *q* при аналізі маломасштабної турбулентності та порівняння їх із колмогорівською моделлю, двовимірною моделлю Ірошникова — Крейчнана та ізотропною логпуассонівською моделлю для плазми сонячного вітру та різних областей магнітошару Землі представлено на рис. 6, 7.

Серед отриманих результатів можна відмітити, що турбулентні процеси у плазмі сонячного вітру для події 17 лютого 2010 р. (дисперсія варіацій, нормована на поточне середнє значення, складає $\delta B/B \approx 0.25$) близькі до двовимірної моделі Ірошникова — Крейчнана, а для події 30 березня 2009 р. (дисперсія варіацій, нормована на поточне середнє значення, складає $\delta B/B \approx \approx 0.05$) — до колмогорівської моделі. Турбулентні процеси всередині магнітошару добре описуються ізотропною логпуасонівською каскадною мо-



Рис. 9. Вейвлет-спектри флуктуацій модуля магнітного поля при русі космічного апарата із плазми сонячного вітру у магнітошар: a - 30 березня 2009 р. (момент перетину магнітошару 12:40:20 UT), $\delta - 17$ лютого 2010 р. (момент перетину магнітошару 14:15:30 UT). Прямокутниками виділено зворотні каскадні процеси

деллю, а процеси у форшоковій області близькі до однорідних турбулентних процесів. Найбільша неоднорідність (переміжність) та неізотропність турбулентних процесів спостерігається у постшоковій області.

Про наявність різних характерних масштабів у плазмі сонячного вітру та області магнітошару свідчать і результати спектрального аналізу (рис. 8).

Тренд в даних видалений високочастотною фільтрацією з частотою відсічки 0.002 Гц. Загальний вигляд спектрів модуля магнітного поля показує, що спектральна густина, представлена у подвійному логарифмічному масштабі, відчуває злам на частоті близько 1 Гц. Лінійна апроксимація розрахована в діапазоні від $10^{-2.5}$ до 1 Гц і в діапазоні від $10^{-0.5}$ до $10^{0.7}$ Гц. Спектральні індекси для області магнітошару помітно змінюються при переході від одного діапазону до іншого: від 1.1 у низькочастотній смузі до 1.72 у високочастотній смузі.

Для плазми сонячного вітру зламу спектру в області іонноциклотронної частоти не спостерігається. Хороша дискретність вимірів флуктуацій магнітного поля дозволила провести аналіз високочастотної області спектру в найбільш цікавій області — у місці переходу космічного апарата із плазми сонячного вітру в магнітошар. Результати представлено на рис. 9.

На рис. 9, *а* добре прослідковується наявність кількох складових частот. Можна відмітити низькочастотну складову $f \approx 0.015...$ 0.025 Гц, яка з'явилась ще перед початком перетину магнітошару (12:40:20 UT). Крім того, можна відмітити наявність складової $f \approx 0.15$ Гц, що поступово зміщувалася з часом до $f \approx 0.07$ Гц. Таким чином, маємо каскадний процес від високих частот до низьких, так званий зворотний каскадний процес. Таку поведінку можна відмітити не тільки в 12:40:20 UT, але і в 12:43:15 UT. Інтенсивність при $f \approx 0.07$ Гц була більша, ніж при $f \approx 0.15$ Гц. Області виникнення зворотних каскадних процесів виділено на рисунку прямокутниками.

Появу зворотних каскадів виявлено і при аналізі даних КА за 17 лютого 2010 р. Можна відмітити наявність 3-каскадних процесів у перехідній області магнітосфери Землі у моменти 14:17:30 UT, 14:19 UT та 14:20 UT.

Попередні результати проведеного вейвлетаналізу вказують на наявність каскадних процесів — здебільшого зворотних каскадних процесів, що свідчить про багатомасштабний характер динаміки магнітосфери. І важливо, що при цьому магнітосфера поводиться як самоорганізована система з різними характерними масштабами.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного статистичного і спектрального аналізу властивостей плазми сонячної фотосфери, сонячного вітру на орбіті Землі та перехідних областей магнітосфери встановлено, що:

• в активних областях Сонця на малих масштабах мають місце турбулентні процеси, які можна описати в рамках моделі Колмогорова (ізотропні турбулентні процеси), а на великих масштабах спостерігаються турбулентні процеси типу Ірошникова — Крейчнана (анізотропні турбулентні процеси, обумовлені ненульовим середнім магнітним полем);

• перехід від спектра Колмогорова до спектра Ірошникова — Крейчнана відбувається на масштабах мезогрануляції і свідчить про наявність ненульових середніх магнітних полів для активних областей;

у спокійній області сонячної фотосфери характер турбулентності близький до моделі Колмогорова (т. ч. маємо нульове середнє магнітне поле);

• відносні варіації магнітного поля в магнітошарі перевищують значення в сонячному вітрі приблизно в 2—5 разів. При цьому всі істотні зміни у плазмі сонячного вітру і у міжпланетному магнітному полі відображаються у збуреннях аналогічних параметрів у магнітошарі. Однак зворотне судження неправильне — не всі варіації параметрів у магнітошарі виникають в результаті флуктуації сонячного вітру або міжпланетного магнітного поля, значна частина з них генерується у самому магнітошарі або на його межах. Джерелами варіацій у магнітошарі є процеси на фронті ударної хвилі;

• аналіз моментів функції розподілу флуктуацій магнітного поля, отриманих в рамках космічної

місії «Кластер-2» показав наявність неоднорідності (переміжності) турбулентності у перехідних областях магнітосфери Землі з критичним масштабом поблизу іонно-циклотронної частоти.

• для плазми сонячного вітру зафіксовано однорідність турбулентних процесів. При цьому турбулентність, за умови дисперсії варіацій магнітного поля до 0.25 можна описати двовимірною моделлю Ірошникова — Крейчнана, а якщо дисперсія суттєво менша (0.15—0.05) то ізотропною колмогорівською моделлю;

• турбулентні процеси всередині магнітошару відповідають ізотропній логпуасонівській каскадній моделі, а у форшоковій області — близькі до однорідних процесів. Найбільша неоднорідність (переміжність) та неізотропність спостерігається в постшоковій області;

• інерційний діапазон в перехідних областях магнітосфери Землі на порядок менший від інерційного діапазону для плазми сонячного вітру;

• в області магнітошару можливе утворення зворотних каскадних процесів.

Узагальнюючи отримані результати, можна вказати на можливість реалізації самоорганізованих магнітних плазмових структур в активних областях сонячної фотосфери та про багатомасштабний характер динаміки магнітосфери. Магнітосфера також поводиться як самоорганізована система з різними характерними масштабами (на це вказує наявність зворотних каскадних процесів при наявності різких стрибків параметрів у перехідних областях магнітосфери Землі).

Автори вдячні співробітникам ІКД РАН Л. М. Зеленому і С. П. Савіну за обговорення отриманих результатів, а також А. Т. Луї, співробітнику лабораторії прикладної фізики університету імені Джона Хопкінса, Меріленд, США.

Робота виконувалася відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр. та за підтримки освітньої програми Міністерства освіти і науки України № 2201250 «Освіта, навчання студентів, аспірантів, наукових і педагогічних кадрів за кордоном» (стажування в лабораторії прикладної фізики університету імені Джона Хопкінса, Меріленд, США).

- Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. — 1996. — 166. — С. 1145—1170.
- Баренблатт Г. И. Турбулентные пограничные слои при очень больших числах Рейнольдса // Успехи мат. наук. — 2004. — 59. — С. 45—62.
- Гледзер Е. Б. Диссипация и перемежаемость турбулентности в рамках гидродинамических аппроксимаций // Изв. Акад. наук. Физ. атмосферы и океана. – 2005. – 41, № 6. – С. 733–751.
- Загородний А. Г., Черемных О. К. Введение в физику плазмы. — Київ: Наук. думка, 2014. — 697 с.
- 5. *Козак Л. В., Костык Р. И., Черемных О. К.* Два режима турбулентности на Солнце // Кинематика и физика небес. тел. 2013. **59**, № 3. С. 22—29.
- Козак Л. В., Пилипенко В. А., Чугунова О. М., Козак П. Н. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя Земли // Космич. исслед. 2011. 49, № 3. С. 202—212.
- Козак Л. В., Савин С. П., Будаев В. П. и др. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — 52, № 4. — С. 470—481.
- Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. 1941. 30, № 4. — С. 299—303.
- Космическая геогелиофизика / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Том 1. — 624 с.
- Кременецький І. О., Черемних О. К. Космічна погода: механізми і прояви. — Київ: Наук. думка, 2009. — 144 с.
- Benzi R., Ciliberto S., Tripiccione R., et al. Extended self similarity in turbulent flows // Phys. Rev. E. – 1993. – 48. – P. R29–R32.
- Boldyrev S. Spectrum of magnetohydrodynamic turbulence // Phys. Rev. Lett. – 2006. – 96. – P. 115002– 115006.
- Consolini G., Kretzschmar M., Lui A. T. Y., et al. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach // J. Geophys. Res. 2005. 110 A07202. doi:10.1029/2004JA010947.
- Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: Log-Poisson statistics and generalized scale covariance // Phys. Rev. Lett. – 1994. – 73. – P. 959–962.
- Grossmann A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // SIAM J. Mathematical Analysis. — 1984. — 15. — P. 723—731.
- Jacobsen K. S., Phan T. D., Eastwood J. P., et al. THEMIS observations of extreme magnetopause motion caused by a hot flow anomaly // J. Geophys. Res. – 2009. – 114 – A08210. doi:10.1029/2008JA013873.
- 17. Kostyk R. I., Khomenko E. V. The effect of acoustic waves on spectral-line profiles in the solar atmosphere: Observa-

tions and theory // Astron. Repts. — 2002. — **46**, № 12. — P. 925—931.

- Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers // J. Fluid Mech. – 1959. – 5. – P. 497–543.
- Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions // J. Fluid Mech. – 1970. – 41. – P. 189–217.
- Schroter E. H., Soltau D., Wiehr E. The German solar telescopes at the Observatorio del Teide // Vistas in Astron. – 1985. – 28. – P. 519–525
- She Z., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence // Phys. Rev. Lett. 1994. 72. P. 336-339.
- Stebbins R. T., Goode P. R. Waves in the Solar Photosphere // Solar. Phys. - 1987. - 110. - P. 237-248.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Л. В. Козак¹, Р. И. Костык²,

О. К. Черемних³, А. С. Прохоренков¹

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

² Главная астрономическая обсерватория

Национальной академии наук Украины, Киев

³ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

ПРИЗНАКИ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА И ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Проведено исследование свойств турбулентных процессов в плазме солнечной фотосферы, солнечном ветре и переходных областях магнитосферы Земли. Для анализа были использованы наземные наблюдения флуктуаций конвективной составляющей скорости в активных и спокойных областях солнечной фотосферы, полученные на 70-см немецком вакуумном башенном телескопе VTT в Изаньи (о. Тенериф, Испания), и спутниковые измерения флуктуаций магнитного поля, полученные космическим аппаратом СЗ миссии «Кластер-2» (данные представлены с временной дискретностью 22.5 Гц). В качестве характеристики турбулентных процессов был проведен (на разных масштабах) анализ моментов функции распределения флуктуаций скорости и магнитного поля; спектральный и вейвлет-анализ. Полученные зависимости сравнивались с имеющимися на сегодня моделями описания как однородных, так и неоднородных турбулентных процессов. Помимо различных типов турбулентных процессов в проанализированных областях отмечается возможность реализации самоорганизующихся магнитных плазменных структур в активных областях солнечной фотосферы и многомасштабный характер динамики магнитосферы. Магнитосфера ведет себя как самоорганизующаяся система с различными характерными масштабами. При этом, при наличии резких скачков параметров в переходных областях магнитосферы Земли фиксируется появление обратных каскадных процессов.

Ключевые слова: турбулентные процессы, переходные области магнитосферы Земли, плазма солнечного ветра, обратные каскадные процессы в магнитосфере Земли, самоорганизация магнитных плазменных структур.

L. V. Kozak¹, R. I. Kostyk²,

O. K. Cheremnykh³, A. S. Prokhorenkov¹

¹ Kyiv National Taras Shevchenko University, Kyiv ² Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

SIGNS OF SELF-ORGANIZATION PROCESSES IN THE SOLAR ATMOSPHERE AND NEAR EARTH SPACE

A study of the properties of turbulent plasma processes in the solar atmosphere, solar wind, and the Earth's magnetosphere transitional areas is made. The ground-based observations of fluctuations of the convective velocity component in active and quiet solar photosphere were used for the analysis. They were obtained by the 70-cm vacuum tower telescope VTT in Isanie (Tenerife Island, Spain), and satellite measurements of magnetic field fluctuations obtained by the satellite C3 of spacecraft mission "Cluster-2" (the data are of temporal discreteness of 22.5 Hz). To characterize turbulent processes we conducted (at different scales) the analysis of moments of distribution function for velocity fluctuations and magnetic field, spectral and wavelet analysis. The obtained dependences were compared with the existing description models of homogeneous and inhomogeneous turbulent processes. Along with various types of turbulent processes in the analyzed areas we have noted the possibility of realization of self-organized plasma structures in magnetic active regions of the solar photosphere and of multiple nature of the dynamics of the magnetosphere. Magnetosphere behaves as a self-organizing system with different characteristic scales. Thus, if the abrupt spikes of the parameters in the transition region of the Earth's magnetosphere are present, then the appearance of the inverse cascade process is recorded.

Key words: turbulent processes, the transition regions of the magnetosphere of the Earth, the solar wind plasma, inverse cascade processes in the Earth's magnetosphere, self-organization magnetic plasma structures.

УДК 528.8.04:(630.95.003.12:574.4)(477)

В. І. Лялько¹, М. О. Попов¹, В. О. Яценко², О. І. Сахацький¹, С. А. Станкевич¹, Я. І. Зєлик², А. О. Козлова¹, Д. М. Мовчан¹, Г. М. Жолобак¹, В. І. Набівач², О. В. Семенів², Л. В. Підгородецька², О. А. Апостолов¹, С. С. Дугін¹, І. О. Пєстова¹, І. Д. Семко², М. В. Ваколюк¹, О. В. Краснопір¹

¹Державна установа «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

і Державного космічного агентства України, Київ

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ БІОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІСОВИХ РОСЛИННИХ УГРУПОВАНЬ ТА АГРОФІТОЦЕНОЗІВ У МЕЖАХ РІЗНИХ ЛАНДШАФТНО-КЛІМАТИЧНИХ ЗОН ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Наведено основні результати спільної роботи Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України та Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, що виконувалася протягом 2014 р. в рамках цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр. Представлено розроблені методи та моделі дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів у межах різних ландшафтнокліматичних зон території України.

Ключові слова: біофізичні параметри, космічні знімки, дистанційне зондування, лісові рослинні угруповання, агрофітоценози, ландшафтно-кліматичні зони України.

В рамках Цільової комплексної програми Національної академії наук України з наукових космічних досліджень на 2012 — 2016 рр. у Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України спільно зі спеціалістами Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України розробляються методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісо-

вих рослинних угруповань та агрофітоценозів у межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України. Робота здійснюється з метою підвищення достовірності визначення біофізичних параметрів типових фітоценозів основних ландшафтно-кліматичних зон України на основі комплексного оброблення багатоспектральних супутникових зображень та даних наземних вимірювань.

У рамках проекту вже проведено певний комплекс досліджень з розробки методів оцінювання обраних біофізичних лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів з використанням наземних і супутникових даних, а саме:

• розроблено метод оцінювання індексу листкової поверхні (*LAI*) та біомаси на основі ком-

<sup>В. І. ЛЯЛЬКО, М. О. ПОПОВ, В. О. ЯЦЕНКО,
О. І. САХАЦЬКИЙ, С. А. СТАНКЕВИЧ, Я. І. ЗЄЛИК,
А. О. КОЗЛОВА, Д. М. МОВЧАН, Г. М. ЖОЛОБАК,
В. І. НАБІВАЧ, О. В. СЕМЕНІВ, Л. В. ПІДГОРОДЕЦЬКА,
О. А. АПОСТОЛОВ, С. С. ДУГІН, І. О. ПЕСТОВА,</sup>

І. Д. СЕМКО, М. В. ВАКОЛЮК, О. В. КРАСНОПІР, 2015

плексування даних LiDAR та польових вимірювань [9];

• розроблено метод оцінювання *LAI* на основі комплексування інформації, що одержується з багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності та польових вимірювань [2, 6, 7];

• визначено характеристики фенологічного розвитку лісових рослинних угруповань на основі інформаційних продуктів MODIS [5, 8];

 одержано оцінки динаміки та залежностей вибраних біофізичних параметрів для рослинного покриву різних тестових ділянок з кліматичними чинниками;

• розроблено методику для оцінювання продуктивності основних сільгоспкультур агроценозів у різних ландшафтно-кліматичних зонах України за наземними та супутниковими даними на основі продуктів MODIS (MOD17);

• проведено оцінювання зволоження земного покриття на основі продуктів MODIS (MOD11 та MOD13) для різних ландшафтно-кліматичних зон України, у першу чергу південних регіонів (степова зона).

Розроблено математичну модель дистанційного оцінювання стану лісів з використанням спектральних даних. Набув подальшого розвитку новий метод побудови робастної регресійної моделі оцінювання стану лісу на основі експертних оцінок.

Розроблено ряд модифікацій процедури оброблення супутникових зображень для задачі оцінювання біофізичних параметрів природних рослинних угруповань та агрофітоценозів за даними космічних спостережень на основі методу опорних векторів [3, 4, 10].

Удосконалено регресійні моделі оцінювання вмісту хлорофілу в рослинному покриві за даними наземних та супутникових спостережень [1].

За час виконання проекту в рамках Програми створено потужну теоретичну основу для підвищення достовірності визначення ряду біофізичних параметрів типових фітоценозів основних ландшафтно-кліматичних зон України на основі комплексного оброблення багатоспектральних супутникових зображень та даних завіркових наземних вимірювань: обґрунтовано вибір основних біофізичних параметрів рослинних угруповань, які можуть бути визначені дистанційно, розроблено відповідні методи, алгоритми та математичні моделі оцінювання обраних біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів, зібрано та систематизовано значний обсяг наземних завіркових даних за тематикою досліджень.

На майбутнє заплановано такі дослідження:

• розробка і тестування (валідація) алгоритмів та демонстраційних програмних модулів для дистанційного оцінювання біофізичних параметрів рослинних угруповань;

• розробка рекомендацій щодо застосування обраних біофізичних параметрів для контролю екологічного стану заповідних територій, оцінювання біорізноманіття та динаміки екосистем, прогнозування врожайності сільськогосподарських культур у межах різних ландшафтнокліматичних зон.

На базі проведених у проекті досліджень будуть створені і запропоновані кінцевому користувачу (установи Державного космічного агентства України та організації Національної академії наук України, Мінагрополітики, Мінприроди України тощо) нові наукоємні інформаційні продукти, які дозволять підвищити ефективність вирішення різноманітних задач, актуальних для сільського і лісового господарств, керування природно-заповідними територіями тощо.

- 1. Зелик Я. І. Регресійні моделі оцінювання вмісту хлорофілу у листі, гілках рослин та у рослинному покрові у цілому за даними наземних та космічних спотережень // XVI Міжнар. наук. конф. «Астрономічна школа молодих вчених», 29—31 травня 2014 р., Кіровоград: Зб. тез. — Київ: КДПУ, 2014. — С. 27.
- 2. Пестова І. О., Станкевич С. А., Лубський М. С. Оцінювання стану рослинності в міських агломераціях на основі супутникових знімків «Січ-2» та RapidEye // Зб. тез 14-ї Укр. конф. з космічних досліджень (8—12 вересня 2014 р., Ужгород, Україна). — Київ: Вид-во «Кафедра», 2014. — С. 151.
- 3. Семенив О. В., Подгородецкая Л. В. Оценивание биофизических параметров водной экосистемы с использованием спутниковых наблюдений и оптимизационных методов // Пробл. управ. и информ. — 2014. — № 5. — С. 99—108.
- 4. Семенів О. В., Підгородецька Л. В. Адаптивна обробка даних ДЗЗ на основі статистичного навчання для

аналізу стану агрофітоценозів // Зб. тез 14-ї української конференції з космічних досліджень (8—12 вересня 2014 р., Ужгород, Україна). — Кмїв: Вид-во «Кафедра», 2014. — С. 170.

- Станкевич С. А., Козлова А. О., Матвиенко Е. В. Определение фенологической изменчивости лесных растительных сообществ Западного Полесья и украинских Карпат с использованием снимков MODIS // Зб. тез 14-ї укр. конф. з космічних досліджень (8—12 вересня 2014 р., Ужгород, Україна). — Київ: Вид-во «Кафедра», 2014. — С. 147.
- 6. Станкевич С. А., Пестова И. А. Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — **11**, № 2. — С. 187—196.
- 7. *Станкевич С. А., Пестова І. О.* Геоінформаційний сервіс оброблення даних для оцінювання рослинності урбанізованих територій // Вісник геодезії та картографії. 2014. № 3. С. 23—26.
- Kozlova A. O., Matvienko O. V. Phenological metrics for deciduous forest of Western Polissia and Ukrainian Carpathians derived from EOS/MODIS satellite data // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки «GEO-UA 2014»: Матер. IV Всеукр. конф. (26—30 травня 2014 р., Київ, Україна). — Київ: Наук. думка, 2014. — С. 35.
- Popov M., Semko I., Kozak I. Estimation of leaf area index using airborne lidar data // Earth observation for sustainable development and security: Materials of reports of the 4th Int. Conference "GEO-UA 2014". — Kyiv, 2014. — P. 103—104. — Electron. publ.
- Semeniv O. V. Remote sensing of biochemical components and harmful agents in vegetation // XVI Міжнар. наук. конф. «Астрономічна школа молодих вчених», 29—31 травня 2014 р., Кіровоград, Україна: Зб. тез. Київ: КДПУ, 2014. С. 80.

Стаття надійшла до редакції 11.12.14

В. И. Лялько¹, М. А. Попов¹, В. А. Яценко²,

А. И. Сахацкий¹, С. А. Станкевич¹, Я. И. Зелык²,

А. А. Козлова¹, Д. М. Мовчан¹, Г. М. Жолобак¹,

- В. И. Набивач², О. В. Семенив², Л. В. Подгородецькая²,
- А. А. Апостолов¹, С. С. Дугин¹, И. А. Пестова¹,

И. Д. Семко², М. В. Ваколюк¹, Е. В. Краснопир¹

¹ Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук Национальной академии наук Украины», Киев

² Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ОЦЕНИВАНИЯ БИОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК И АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В ПРЕДЕЛАХ РАЗНЫХ ЛАНДШАФТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

Приведены основные результаты совместной работы Научного центра аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук Национальной академии наук Украины и Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, выполнявшейся на протяжении 2014 г. в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг. Представлены разработанные методы и модели дистанционного оценивания биофизических параметров лесных растительных группировок и агрофитоценозов в пределах разных ландшафтно-климатических зон территории Украины.

Ключевые слова: биофизические параметры, космические снимки, дистанционное зондирование, лесные растительные сообщества, агрофитоценозы, ландшафтноклиматические зоны Украины.

- V. I. Lyalko¹, M. O. Popov¹, V. O. Yatsenko²,
- O. I. Sakhatsky¹, S. A. Stankevich¹, Ya. I. Zelyk²,

A. O. Kozlova¹, D. M. Movchan¹, G. M. Zholobak¹,

V. I. Nabivach², O. V. Semeniv², L. V. Pidgorodetska²,

O. A. Apostolov¹, S. S. Dugin¹, I. O. Pestova¹, I. D. Semko²,

M. V. Vakoluk¹, O. V. Krasnopir¹

¹ State institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth Institute of Geological Science National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv
² Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

REMOTE ESTIMATION TECHNIQUES OF BIOPHYSICAL PARAMETERS OF FOREST PLANT COMMUNITIES AND AGROPHYTOCENOSES WITHIN DIFFERENT LANDSCAPE AND CLIMATIC ZONES OF UKRAINE

The main results of CASRE IGS NASU and SRI NSAU-SSAU collaboration during 2014 in the framework of the Program on Space Research of NAS are described. Developed models and techniques for biophysical parameters remote estimation of forest plant communities and agrophytocenoses within different landscape and climatic zones of Ukraine are presented.

Key words: biophysical parameters, satellite imagery, remote sensing, forest plant communities, agrophytocenoses, land-scape-climatic zones of Ukraine.

УДК 571.23:576.3:52-423

В. О. Бриков Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, Київ

БІОЕНЕРГЕТИКА РОСЛИННИХ КЛІТИН В УМОВАХ МІКРОГРАВІТАЦІЇ

Підсумовуються дані про ультраструктуру та функціонування енергетичних органел у клітинах автотрофних та гетеротрофних тканин вищих рослин, що зростали під впливом клиностатування. Показано, що завдяки адаптивним реакціям мітохондріому в гетеротрофних клітинах кореня зберігається енергетичний гомеостаз, підтримка якого в космічному польоті буде залежати від надходження субстратів до окислювального фосфорилювання. Встановлено, що при субоптимальному освітленні рослин рівень перебудов ультраструктури хлоропластів був виражений більшою мірою, аніж при оптимальних умовах освітлення. Висунуто припущення, що мікрогравітація посилює негативну дію субоптимальних умов освітлення на основний метаболізм рослинних організмів. Обговорено перспективи подальших досліджень в цій області та деякі прикладні аспекти створення ростових камер для культивування рослин на борту космічних літальних апаратів.

Ключові слова: мітохондрії, дихання, альтернативна оксидаза, хлоропласти, ультраструктура, клиностатування.

вступ

Здатність рослинних організмів до підтримання енергетичного гомеостазу у варіабельних умовах зовнішнього середовища залежить від балансу між запасанням вуглеводів протягом фотосинтезу у хлоропластах та їхньою подальшою утилізацією у процесі дихання мітохондрій. Розщеплення органічних субстратів з поглинанням кисню у процесі окислювального фосфорилювання призводить до утворення АТФ, що є основним енергетичним донором більшості ферментативних процесів [17]. В умовах освітлення листків, коли відбувається фотосинтез, дихання мітохондрій майже повністю пригнічене, що сприяє накопиченню крохмалю. За різними даними від 30 до 70 % вуглеводів, синтезованих протягом світлового періоду у фотосинтезі, транспортуються в корінь, де утилізуються в диханні [13]. Крім катаболічної функції окислювального фосфорилюваня, що полягає у розщепленні органічних субстратів для синтезу АТФ, цикл трикарбонових

кислот мітохондрій виконує анаболічні функції, оскільки він є унікальним місцем утворення вуглецевих скелетів, що використовуються у синтезі білків, нуклеїнових кислот та вторинних метаболітів [20]. Анаболічні функції мітохондрій відіграють важливе значення у тканинах, що ростуть. Особливістю дихання мітохондрій вищих рослин є наявність альтернативної оксидази в електронно-транспортному ланцюзі, активація якої в стресових умовах середовища може суттєво знижувати ефективність синтезу АТФ при диханні, знижуючи інтенсивність ростових процесів [12] та поглинання мінеральних речовин коренем [9]. Тісна інтеграція та взаємозалежність процесів дихання та фотосинтезу визначають метаболічний статус клітин, який є сигналом для зміни експресії ядерного геному шляхом ретроградної регуляції під дією стресових чинників середовища [23].

Дослідження біологічних ефектів реальної мікрогравітації та її моделювання в лабораторних умовах достатньо широко висвітлюють функціонування мітохондрій тварин та людини у зв'язку з очевидними системними порушення-

[©] В. О. БРИКОВ, 2015

ми опорно-рухової, серцево-судинної та імунної систем. В умовах космічного польоту гравітаційне розвантаження викликає порушення енергетики тваринних клітин. Хоча спектр встановлених ефектів достатньо широкий, але більшість досліджень свідчать про інгібування метаболічної активності мітохондрій [25]. Вважається, що в умовах мікрогравітації за рахунок регуляції експресії відповідних ферментів відбувається інгібування метаболічного шляху окислення жирних кислот — енергетичне забезпечення клітин здійснюється в основному за рахунок вуглеводів [2, 27]. У той же час літературні відомості щодо стану мітохондріому вищих рослин в умовах мікрогравітації вкрай обмежені. Дані стосовно ультраструктури органел інколи суперечливі [1, 26]. Про стан окислювального фосфорилювання в умовах космічного польоту майже нічого не відомо. Вважається, що при достатній ілюмінації рослин мікрогравітація не впливає на структуру та функції фотосинтетичного апарату рослинних клітин, що було продемонстровано при вирощуванні Triticum aestivum в Biomass Production System (BPS) в експерименті PESTO [29]. В той же час при використанні інших культиваційних камер спостерігаються достатньо суттєві перебудови фотосинтетичного апарату [11, 32]. Таким чином, ступінь перебудов мітохондрій та пластид, їхня взаємодія, регуляція енергетичного метаболізму рослинних організмів залишаються не з'ясованими.

Рослини є безальтернативним компонентом біорегенеративних систем життєзабезпечення (БСЖ) у довготривалих космічних місіях [8]. Встановлено, що рослини можуть здійснювати повний життєвий цикл від насіння до насіння в умовах мікрогравітації [3, 16, 30]. Отримання урожаю, тобто накопичення біомаси та насіннєва репродукція рослин у першому та наступних поколіннях під час довготривалих космічних польотів потребують експериментальних даних про стан основного метаболізму рослинного організму в умовах мікрогравітації. Формування уявлень про біоенергетику рослинних клітин в умовах мікрогравітації та, що важливо, при можливих флуктуаціях рівня освітлення, вологості, газового складу середовища повинні сприяти прогнозуванню стану рослинних організмів, їхньої продуктивності та стійкості протягом довготривалого культивування на борту космічних апаратів в майбутньому.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В лабораторних умовах мікрогравітацію моделювали, використовуючи загальноприйнятий метод повільного горизонтального клиностатування з швидкістю обертання осі 2 об/хв. У серії експериментів з дослідження впливу модельованої мікрогравітації використані рослини Pisum sativum L. (сорт Альфа). Дослідження стану мітохондріому було проведено в клітинах зародкового кореня етиольованих проростків, для того щоб виключити вплив фотосинтезу та його продуктів, рівень яких залежить від освітлення. Відібрані насінини по одній загортали у трубочки з вологого фільтрувального паперу і вкладали у стаканчики, що поміщали у чашки клиностату. Проростки вирощували в темряві при температурі 22-24 °С протягом 5 діб з моменту загортання насіння в трубочки. Для дослідження фотосинтетичного апарату клітин насіння висаджували у чашки клиностату діаметром 9 см, наповнені вермикулітом. Після вкорінення рослин протягом 5 діб чашки поміщали на горизонтальний клиностат у культиваційну камеру на 12 діб при температурі 22—23 °С, вологості повітря 60 %. Щільність потоку квантів фотосинтетично-активної радіації (ФАР) складала 180 та 80 мкмоль · м⁻²с⁻¹, що є відповідно достатніми та субоптимальними умовами для росту росли. В якості джерела освітлення використовували білі люмінесцентні лампи. Фотоперіод складав 16/8 год (день/ніч). Протягом досліду рослини поливали, періодично вносячи рівні кількості дистильованої води в чашки. Крім того, на 1-шу та 6-ту добу вносили 1/2 р-н Хогланла.

Для електронно-мікроскопічного дослідження відбирали зразки розміром 2×1 мм. Підготовку зразків проводили за стандартним методом [6]. Стисло: фіксація р-ом 2.5 % глютарового альдегіду на 0.15 М кокодилатному буфері (pH 7.4) для листків або на 0.1 М кокодилатному буфері (pH 7.2) для коренів протягом 4 год при температурі 4 °C, відмивання декілька разів бу-



Рис. 1. Фрагменти клітин з мітохондріями (М) у клітинах дистальної зони розтягу 5-добових проростків гороху у стаціонарному контролі (*a*) та під впливом клиностатування (б)

фером, постфіксація p-ом 1 % OsO4 на кокодилатному буфері протягом 12 год, після відмивання р-ом 1 % танінової кислоти протягом 1 год. Зразки зневоднювали у серії спиртів зростаючої концентрації та ацетоні, потім заливали сумішшю епон-аралдит. Ультратонкі зрізи (50 — 70 нм) отримували на ультрамікротомі MT-XL (RMC) та контрастували уранілу ацетатом і цитратом свинцю. Зразки досліджували на трансмісійних електронних мікроскопах JEM 1200EX та JEM 1230EX (Jeol) та фотографували на плівку Alliance Camera CE (Agfa). Отримані негативні зображення сканували, після чого аналізували площу пластид на зрізах, товщину гран, кількість тилакоїдів у гранах, кількість та розмір крохмальних зерен за допомогою програмного забезпечення Image J (http://imagej.nih.gov).

Поглинання кисню кореневими апексами 1-, 3- та 5-добових проростків у контролі та після клиностатування визначали полярографічним методом, використовуючи полярограф Охуgraph (Hansatech). Для кожного вимірювання відбирали по 7 кореневих апексів розміром 4—6 мм, масою 10—15 мг, які поміщали в інкубаційну камеру приладу об'ємом 1.5 мл з дистильованою водою, що попередньо була насичена киснем, шляхом барботування повітрям протягом 20 хв. Вимірювання швидкості поглинання кореневими апексами кисню з розчину проводили при +24 °C протягом 12—15 хв, починаючи з 2-ї хв після занурення кореневих апексів у воду. В даних часових рамках загальна швидкість поглинання кисню за відсутності інгібіторів була лінійною.

Концентрації інгібіторів були підібрані експериментально. Для інгібування цитохромоксидази використовували 3 млМ КСN. Для інгібування альтернативної оксидази використовували саліцилгідроксамову кислоту (СГК) з діючою концентрацією 3 млМ. Кінцеві концентрації інгібіторів у розчині отримували шляхом внесення відповідних кількостей маточних розчинів концентрацією 0.2M КСN в дистильованій воді та 1М СГК у диметилсульфоксиді.

Із застосуванням інгібіторів визначали потужність альтернативного шляху у диханні або СГКчутливе, СN-резистентне дихання, як різницю між швидкість поглинання кисню у присутності КСN та залишковим диханням у присутності КСN та СГК. Рівень залишкового диханням був низьким, його максимальний рівень складав близько 4 % як у контрольних, так і у клиностатованих зразках.

Експресію гену *AOX* визначали в цілих коренях, кореневих апексах (6 мм) та з зоні диференціювання 5-добових етиольованих проростків. Загальну PHK зі зразків виділяли з використанням InnuPREP Plant RNA Kit (Analytikjena) згідно з методом, запропонованим виробником. Визначення кількості, цілісності РНК, зворотну транскрипцію та полімеразну ланцюгову реакцію в реальному часі проводили згідно з методом Талалаєва і Кордюм [31]. В якості внутрішнього контролю використовували ген *ACTIN3* (GenBank: U81049.1), рівень експресії якого є постійним і не залежить від зовнішніх впливів [24]. Нуклеотидні послідовності *AOX* для гороху були взяті з роботи [15]. Дизайн нуклотидних послідовностей праймерів здійснено у Vector NTI Oligo Design (NCBI EST). Послідовності задіяних праймерів –

ACTIN3:

F – CCAAATCATGTTTGAGGCTTTTAA, R – GTGAAAGAACGGCCTGAATAGC; *AOX*:

> F –AGGTAACCAACCATACGG, R – TAAGGCGTTGCTAGAAGA.

ПЛР проводили на ампліфікаторі iCycler iQ system (Bio-Rad). Обробку результатів здійснювали за алгоритмом, раніше описаним Pfaffl [19], використовуючи програмне забезпечення Gene Expression (MacroTM).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження ультраструктури мітохондрій в різних ростових зонах кореня показали їхню різну чутливість до дії клиностатування. Найбільш суттєві перебудови ультраструктури відбувалися в дистальній зоні розтягу (ДЗР) (рис. 1). Відмічено зменшення поліморфності мітохондріому, зменшення площі органел на зрізах, збільшення площі крист та електронної щільності матриксу, що загалом характеризуються як помірна конденсація органел. Крім того, раніше ми встановили, що вплив клиностатування на ультраструктуру мітохондрій посилювався зі збільшенням тривалості дії чинника [4]. Ці дані свідчать, що на фазі повільного розтягу клітини в ДЗР, що в нормі володіють найвищим рівнем метаболізму серед всіх ростових зон, зазнають найсуттєвіших перебудов енергетичного метаболізму при дії модельованої мікрогравітації.

Дані стосовно ультраструктури мітохондрій узгоджуються з отриманими даними щодо інтенсивності тканинного дихання кореневих апексів в цих же часових рамках. Протягом клиностату-



Рис. 2. Загальна швидкість дихання (a) та потужність альтернативного шляху дихання (δ) кореневих апексів протягом 5 діб росту у стаціонарному контролі (1) та в умовах клиностатування (2). Зірочкою позначено достовірну різницю між значеннями

вання спостерігається тенденція до зростання швидкості поглинання кисню, що на п'яту добу досягає достовірної різниці у 7 % порівняно з таким у стаціонарному контролі (рис. 2, *a*). Припускається, що зростання дихання пов'язане з активацією процесів окислювального фосфорилювання. В той же час зростання дихання коренів в умовах клиностатування могло бути пов'язане з активацією альтернативної оксидази. Відомо, що її індукція на рівні експресії генів, кількості білку або його активності відбувається у відповідь на дію стресових чинників середовища і призводить до роз'єднання окислення та



Рис. 3. Відносний рівень експресії *АОХ* у цілих коренях, кореневих апексах та зрілій ділянці коренів 5-добових проростків гороху у стаціонарному контролі (*1*) та в умовах клиностатування (*2*)

фосфорилювання, і тому суттєво знижує ефективність накопичення АТФ [22]. В той же час її основною функцією є захисна, що дозволяє уникнути утворення надмірної кількості активних форм кисню при створенні несприятливих умов для протікання процесів окислювального фосфорилювання [22, 33]. Із застосуванням методу інгібіторного аналізу було встановлено, що потужність альтернативного CN-резистентного дихання не змінювалася в умовах клиностатування (рис. 2, δ). Крім того, було встановлено, що кількість транскриптів гену *AOX* як у ростових, так і у зрілих зонах кореня не відрізнялася від такої у стаціонарному контролі (рис. 3).

Таким чином, ми вперше встановили, що зростання швидкості дихання коренів в умовах клиностатування не пов'язане з активацією стрес-індукованої альтернативної оксидази, тобто в умовах мікрогравітації не створюються умови, які б перешкоджали діяльності основного енергоефективного цитохромного шляху електронно-транспортного ланцюгу.

Наведені вище дані про ультраструктуру та дихання мітохондрій є інтегральними показниками, дослідженими неінвазивними методами, вказують на здатність мітохондрій до підтримки структурно-функціональної організації мітохондрій близькими до норми. У той же час дослідження метаболічної активності мітохондрій ізольованих з коренів 5-добових проростків вказують на суттєві зміни у протіканні процесу окислювального фосфорилювання в умовах модельованої мікрогравітації [5]. Було встановлено, що в активному фосфорилюючому стані за Chance [7] швидкість окислення екзогенно доданого малату або НАДН зростала у мітохондріальних фракцій, ізольованих з коренів рослин, що зазнали впливу клиностатування. Ці дані можуть бути причиною зростання тканинного дихання, описаного вище. Однак припускається, що активація окислювальних процесів не призводить до акумуляції більшої кількості молекул АТФ порівняно з контролем, оскільки відбувається зниження ефективності фосфорилювання [5]. Вважається, що саме у відповідь на зниження ефективності фосфорилювання відбувається активація окислювальних процесів, що дозволяє підтримати енергетичний гомеостаз клітин кореня в умовах мікрогравітації. Таким чином, ми вважаємо, що в умовах мікрогравітації для забезпечення повноцінного росту зародкового кореня рослин необхідна належна аерація ризосфери, оскільки зростає потреба клітин кореня у кисні. У деяких космічних експериментах з вирощування рослин було встановлено, що метаболізм кореня знаходиться в стані гіпоксії [14, 18, 21]. Відмічено активацію гліколізу та зростання активності та генетичної експресії алкогольдегідрогенази [28]. Вважається, що гіпоксія ризосфери є наслідком біофізичної лімітації доступу кисню внаслідок порушення процесів дифузії за відсутності гравітації [14]. Враховуючи погіршення аерації субстрату та зростання інтернальної потреби клітин кореня до кисню, штучне нагнітання повітря до ризосфери є необхідним для забезпечення нормального перебігу дихання та енергетичного метаболізму в умовах мікрогравітації.

Крім того, зростання окислювальної активності мітохондрій, спрямоване на забезпечення енергетичного гомеостазу клітин кореня, потребує належного надходження вуглеводів для підтримки енергетики клітин кореня. Слід наголосити, що умови вирощування рослинного матеріалу були оптимальними, а в обраній моделі для дослідження — корені етиольованих проростків, вуглецеве живлення клітини кореня



Рис. 4. Фрагменти клітин палісадної паренхіми з хлоропластами у стаціонарному контролі (*a*, *в*) та за умов клиностатування (δ , *г*) при щільності потоку квантів ФАР 180 мкмоль м⁻²с⁻¹ (*a*, δ) та 80 мкмоль м⁻²с⁻¹ (*b*, *c*)

забезпечувалося продуктами гідролізу запасних речовин із сім'ядоль. В той же час невідомо, якою буде відповідь мітохондрій кореня на фазі вегетації рослин, де субстратне забезпечення окислювального фосфорилювання залежить від умов освітлення, функціональних кондицій фотосинтетичного апарату листків та транспорту поживних речовин між органами рослин.

Результати електронно-мікроскопічного дослідження показали, що загалом ультраструктура клітин палісадної паренхіми як в контролі, так і за умов клиностатування була типовою для клітин мезофілу. Основний об'єм клітини займає центральна вакуоль. Органели знаходяться у периферійному шарі цитоплазми. Хлоропласти, як правило, лінзовидної форми, їхня строма завжди щільна, насичена великою кількістю тилакоїдних мембран (рис. 4, a, δ). Мітохондрії дрібні, округлої форми, інколи дещо видовжені. Відмічено численні контакти між хлоропластами, мітохондріями та пероксисомами. Хлоропласти часто утворюють інвагінації чашовидної форми, де можуть перебувати мітохондрії, або зрідка — ліпідні краплі. Загалом така ультраструктура клітин свідчить про високу функціональну активність клітин мезофілу. При культивуванні рослин при щільності потоку квантів ФАР 180 мкмоль·м⁻²с⁻¹ розмір хлоропластів за

умов клиностатування зменшувався на 15 % відповідно до такого у стаціонарному контролі. Товщина гран також була меншою на 10 % за таку в контролі, що відповідає товщині одного-двох тилакоїдів (таблиця). Кількість і розмір зерен крохмалю не відрізнялися від таких у контролі. Можна зробити висновок, що при достатньому освітлені рослин клиностатування призводить до мінорних змін в ультраструктурі енергетичних органел в клітинах мезофілу. При культивуванні рослин при шільності потоку квантів ФАР 80 мкмоль·м⁻²с⁻¹ спостерігаються більш суттєві відмінності ультраструктур хлоропластів мезофілу у рослин, що зростали в умовах клиностатування (рис. 4, в, г). Розмір хлоропластів зменшувався на 24 %, розмір крохмальних зерен — на 63 % (таблиця). Товщина гран також була меншою при клиностатуванні на 13 %. Крім того, зростала варіативність форми мітохондрій на зрізах. Найбільш цікавим виявився той факт, що при зниженні щільності потоку квантів ФАР з 180 на 80 мкмоль·м⁻²с⁻¹ в стаціонарному контролі спостерігається чітка реакція хлоропластів, що полягала у збільшенні їхніх розмірів, тоді як в умовах клиностатування не відбувалося подібної відповіді фотосинтетичного апарату.

Таким чином, в умовах клиностатування не було відповіді хлоропластів на зміну щільності потоку квантів ФАР, що, на нашу думку, може мати негативний вплив на функціонування органел.

Згідно із висновками роботи [34] у більшості експериментів [10, 11, 32] з культивування рос-

лин в умовах реальної мікрогравітації у космічному польоті в ростових камерах не були забезпечені оптимальні умови середовища - надмірний рівень вологості субстрату та флуктуації термператури, накопичення етилену, а виявлені порушення у структурно-функціональній організації хлоропластів викликані не впливом мікрогравітації, а негативною дією факторів середовища, підтримка яких в умовах космічного польоту не завжди була задовільною. Аналіз літературних даних про стан фотосинтетичного апарату, газообміну, накопичення біомаси рослинами показує їхню різну відповідь на дію мікрогравітації, що залежить від рівня освітлення в умовах комічного польоту. На проростках Triticum aestivum при щільності потоку квантів ФАР 280 мкмоль·м⁻²с⁻¹ протягом 24 діб відбувалося незначне зменшення товщини листкової пластинки та щільності розміщення тилакоїдів у гранах, тоді як інтенсивність фотосинтетичних процесів, кількість крохмалю, розчинних вуглеводів та сухої маси проростків не змінювалася [29]. Аналіз рослин польотного матеріалу, який перебував протягом 14 діб в умовах мікрогравітації при щільності потоку квантів $\Phi AP 100$ мкмоль м⁻²с⁻¹, показав, що у проростків Brassica rapa відбувалося суттєве зниження кількості комплексів фотосистеми І (ФСІ) та її активності в тилакоїдних мембранах. Крім того, на 32 % знижувалася активність водо-окислювального субкомплексу фотосистеми II (ФСІІ), що свідчить про його дисфункцію [10]. Припускається, що суттєві порушення в ЕТЛ хлоропластів, викликані перебуванням в

Кількісні показники ультраструктури хлоропластів мезофілу гороху за різного рівня щільності потоку квантів ФАР в умовах клиностатування

Варіант досліду	Площа хлоропластів, мкм ²	Товщина гран, мкм	Площа крохмальних зерен, мкм ²	Кількість крохмальних зерен / хлоропласт
180 мкмоль · м ⁻² с ⁻¹ контроль клиностат	$7.5 \pm 0.20^{a} (n = 224)$ $6.2 \pm 0.17^{6} (n = 190)$	$\begin{array}{l} 0.21 \pm 0.005^a (n=206) \\ 0.19 \pm 0.008^6 (n=62) \end{array}$	$\begin{array}{l} 0.22 \pm 0.015^{a} \ (n=143) \\ 0.23 \pm 0.013^{a} \ (n=146) \end{array}$	$2.4 \pm 0.13^{a} (n = 65)$ $2.4 \pm 0.12^{a} (n = 153)$
80 мкмоль · м ⁻² с ⁻¹ контроль клиностат	$\begin{array}{l} 8.6 \pm 0.32^{s} \ (n=90) \\ 6.6 \pm 0.25^{\delta} \ (n=92) \end{array}$	$0.22 \pm 0.008^{a} (n = 151)$ $0.19 \pm 0.005^{6} (n = 272)$	$\begin{array}{l} 0.51 \pm 0.042^{\delta} \ (n=78) \\ 0.19 \pm 0.015^{a} \ (n=65) \end{array}$	$3.1 \pm 0.18^{\delta} (n = 64)$ $2.3 \pm 0.21^{a} (n = 64)$

Примітка. Дані наведені в формі $M \pm SE$, n -кількість значень у вибірці. Незалежно в кожній колонці різними буквами вказані достовірні відмінності між значеннями ($p \le 0.05$).

умовах космічного польоту, компенсуються перерозподілом вмісту пігментів (співвідношення хлорофілів a/b) на користь хлорофілу a [10]. Ще більш виражений негативний ефект, що полягав у зниженні сирої маси проростків на 25 %, зниженні активності електронного транспорту через ФСІ та ФСІІ на 28 %, зростанні швидкості темнового дихання порівняно з такими у контролі протягом 10-добового культивування проростків Triticum aestivum в умовах космічного польоту [32]. В наведених експериментах ступінь виявлених негативних ефектів обернено залежала від тривалості дії мікрогравітації найсуттєвіші порушення спостерігалися при короткій експозиції рослин в умовах космічного польоту.

Таким чином, у наведених дослідах рівень впливу мікрогравітації на фотосинтетичний апарат, який відповідає за вуглеводневе живлення, залежав не стільки від строку дії мікрогравітації, скільки від рівня ілюмінації рослин. На основі отриманих результатів та аналізу літературних даних ми висуваємо припущення, що мікрогравітація посилює негативну дію субоптимальних умов середовища (освітлення та, не виключено, температури, вологості, CO₂) на основний метаболізм рослинних організмів.

У сучасних культиваційних камерах (для прикладу BPS) при достатній щільності потоку квантів ФАР 280 мкмоль \cdot м⁻²с⁻¹, та рівні СО₂, що у чотири рази перевищує такий в атмосфері Землі, вентиляцією ризосфери, використанням скруберів етилену вдається зберегти показники росту рослин, показники фотосинтезу та накопичення асимілятів близькими до наземних на посадковій площі 0.0264 м², при висоті камери в 16 см [29]. Проте загальна кількість отриманої біомаси та синтезованого кисню протягом вегетації були незначними. Чи можна забезпечити подібні параметри освітлення культиваційного модуля площею в 1 м² при висоті камери в 60 см та ізолювати її від атмосфери космічного апарата? На наш погляд урожай, отриманий на такій площі, буде не адекватним затраченим ресурсам. У той же час зниження рівня освітлення та рівня СО, в ростових камерах, як показано вище, викликає порушення у вуглеводневому живленні рослин. Таке протиріччя, що виникає при розробці культиваційних модулів, потрібно подолати шляхом визначення мінімальних значень параметрів, достатніх для задоволення енергетичних потреб рослин, що реалізуються у накопиченні біомаси. З'ясування адаптивних перебудов енергетичного метаболізму, меж стійкості рослин в умовах мікрогравітації дозволять мінімізувати ресурси, витрачені на обслуговування життєдіяльності рослинних організмів у БСЖ.

Автор вдячний фахівцям Центру колективного користування приладами ГЕНТЕСТ, що функціонує на базі ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України» за сприяння молекулярним дослідженням.

Робота виконана в рамках проекту «Біоенергетика рослинних клітин в умовах мікрогравітації» Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень.

- Климчук Д. О. Структурно-функціональні особливості мітохондрій в статоцитах коренів сої за умов мікрогравітації // Цитология и генетика. 2007. 4. — С. 30—35.
- Baldwin K. M., Herrick R. E., McCue S. A. Substrate oxidation capacity in rodent skeletal muscle: effects of exposure to zero gravity // J. Appl. Physiol. 1993. 75. P. 2466–2470.
- Bingham G. E., Levinskikh M. A., Sytchev V. N. Effects of gravity on plant growth // J. Gravit. Physiol. – 2000 – 7. – P. 5–8.
- Brykov V. Clinorotation affects the ultrastructure of pea root mitochondria // Micrograv. Sci. Technol. – 2011. – 23. – P. 215–219.
- 5. *Brykov V. O., Shugaev A. G, Generozova I. P.* Ultrastructure and metabolic activity of pea mitochondria under clinoro-tation // Cytology and Genetics. 2012. **46**. P. 144–149.
- Carde J.-P. Electron microscopy of plant cell membranes // Methods Enzymol. / Eds L. Packer, R. Douce. – New York: Academic Press Inc., 1987. – 148. – P. 599–622.
- Chance B., Williams G. R. The respiratory chain and oxidative phosphorylation // Adv. Enzymol. — 1956. — 17. — P. 65—134.
- Ferl R., Wheeler R., Levine H. G., et al. Plants in space // Curr. Opin. Plant Biol. – 2002. – 5. – P. 258–263.
- Jeong J., Guerinota M. L. Homing in on iron homeostasis in plants // Trends Plant Sci. – 2009. – 14. – P. 280– 285.

- Jiao S. X., Hilaire E., Paulsen A. G., et al. Brassica rapa plants adapted to microgravity with reduced photosystem I and its photochemical activity // Physiol. plant. – 2004. – 122. – P. 281–291.
- Kochubey S. M., Adamchuk N. I., Kordyum E. L., et al. Microgravity effects the photosynthetic apparatus of *Brassica* rapa L. // Plant Biosystems. – 2004. – **138**. – P. 1–9.
- Lambers H. Respiration in intact plant tissues: its regulation and dependence on environmental factors, metabolism and invading organisms // Higher Plant Cell Respiration / Eds R. Douce, D. A. Day. — Berlin: Springer, 1985. — 18. — P. 202—247.
- Lambers H., Scheurwater I., Atkin O. K. Respiratory patterns in roots in relation to their functioning // Plant Roots: The Hidden Half / Eds Y.Waisel, A. Eshel, V. Kafakki. — New York: Marcel Dekker, 1996. — P. 323—362.
- Liao J., Liu G., Monje O., Stutte G. W., et al. Induction of hypoxic root metabolism results from physical limitations in O₂ bioavailability in microgravity // Adv. Space Res. – 2004. – 34. – P. 1579–1584.
- Małecka A., Derba-Maceluch M., Kaczorowska K., et al. Reactive oxygen species production and antioxidative defense system in pea root tissues treated with lead ions: mitochondrial and peroxisomal level // Acta Physiol. Plant. – 2009. – 31. – P. 1065–1075.
- Merkys A. J., Laurinavičius R. S., Švegždiene D. V. Plant growth, development and embryogenesis during Salyut-7 flight // Adv. Space Res. – 1984. – 4. – P. 55–63.
- Millar A. H., Whelan J., Soole K. L., et al. Organization and regulation of mitochondrial respiration in plants // Annu. Rev. Plant Biol. – 2011. – 62. – P. 79–104.
- Paul A.-L., Wheeler R. M., Levine H. G., et al. Fundamental plant biology enabled by the space shuttle // Amer. J. Bot. - 2013. - 100. - P. 226-234.
- Pfaffl M. W. A new mathematical model for relative quantification in real-time RT-PCR // Nucl. Acids Res. 2000. – 29. – P. e45.
- Plaxton W. C., Podestá E. F. The functional organization and control of plant respiration // Crit. Rev. Plant. Sci. – 2006. – 25. – P. 159–198.
- Porterfield D. M. The biophysical limitations in physiological transport and exchange in plants grown in microgravity // J. Plant Growth Regul. – 2002. – 21. – P. 177–190.
- Rasmusson A. G., Møller I. M. Mitochondrial electron transport and plant stress // Adv. Plant Biol. — 2011. — 1. — P. 357—381.

- Rhoads D. M., Subbaiah C. C. Mitochondrial retrograde regulation in plants // Mitochondrion. — 2007. — 7. — P. 177—194.
- Saha G. C., Vandemark G. J. Evaluation of expression stability of candidate references genes among green and yellow pea cultivars (*Pisum sativum* L.) subjected to abiotic and biotic stress // Amer. J. Plant Sci. 2012. 3. P. 235–242.
- Shenkman B. S., Nemirovskaya T. L., Belozerova I. N., et al. Mitochondrial adaptations in skeletal muscle cells in mammals exposed to gravitational unloading // J. Grav. Physiol. 2002. 9. P. 159–162.
- Slocum R. D., Gaynor J. J., Galston A. W. Cytological and ultrastructural studies on root tissues // Ann. Bot. – 1984. – 54. – P. 65–76.
- Stein T. P., Schlutera M. D, Galante A. T., et al. Energy metabolism pathways in rat muscle under conditions of simulated microgravity // J. Nutr. Biochem. – 2002. – 13. – P. 471–478.
- Stout S. C., Porterfield D. M., Briarty L. G., et al. Evidence of root zone hypoxia in Brassica rapa L. grown in microgravity // Int. J. Plant Sci. — 2001. — 162. — P. 249— 255.
- Stutte G. W., Monje O., Hatfield R. D., et al. Microgravity effects on leaf morphology, cell structure, carbon metabolism and mRNA expression of dwarf wheat // Planta. — 2006. — 224. — P. 1038—1049.
- Sychev V. N., Levinskikh M. A., Gostinsky S. A., et al. Spaceflight effects on consecutive generations of peas grown onboard the Russian segment of the International Space Station // Acta Astronaut. - 2007. - 60. -P. 426-432.
- Talalaiev O., Korduym E. Expression of small heat shock protein (sHSP) genes in the garden pea (Pisum sativum) under slow horizontal clinorotation // Plant Signaling and Behavior. – 2014. – 9. – Published online: 30 Apr 2014.
- Tripathy B. C., Brown C. S., Levine H. G., et al. Growth and photosynthetic responses of wheat plants grown in space // Plant Physiol. – 1996. – 110. – P. 801–806.
- Van Aken O., Giraud E., Clifton R., et al. Alternative oxidase: a target and regulator of stress responses // Physiol. plant. – 2009. – 137. – P. 354–361.
- Wolff S. A., Coelho L. H., Zabrodina M., et al. Plant mineral nutrition, gas exchange and photosynthesis in space: A review // Adv. Space Res. – 2013. – 51. – P. 465–475.

Стаття надійшла до редакції 14.01.15

В. А. Бриков

Институт ботаники им. М. Г. Холодного Национальной академии наук Украины, Киев

БИОЭНЕРГЕТИКА РАСТИТЕЛЬНЫХ КЛЕТОК В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Суммируются данные об ультраструктуре и функционировании энергетических органелл в клетках автотрофных та гетеротрофных тканей высших растений, которые произрастали под влиянием клиностатирования. Показано, что благодаря адаптивным реакциям митохондриома в гетеротрофных клетках корня сохраняется энергетический гомеостаз, поддержка которого в космическом полете будет зависеть от поступления субстратов к окислительному фосфорилированию. Установлено, что при субоптимальном освещении растений уровень перестройки ультраструктуры хлоропластов был выражен сильнее, чем при оптимальных условиях освещения. Выдвинуто предположение, что микрогравитация усиливает отрицательное действие субоптимальных условий освещения на основной метаболизм растительных организмов. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований в этой области и некоторые прикладные аспекты создания ростовых камер для культивирования растений на борту космических летательных аппаратов.

Ключевые слова: митохондрии, дыхание, альтернативная оксидаза, хлоропласты, ультраструктура.

V. O. Brykov

M. G. Kholodnyj Institute of Botany of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

BIOENERGETICS OF PLANT CELLS IN MICROGRAVITY

This paper summarizes the data on the ultrastructure and functioning of energy organelles in cells of autotrophic and heterotrophic tissues of higher plants that grow under the influence of clinorotation. It is shown that due to the adaptive reactions in mitochondria the energy homeostasis is retained in heterotrophic root cells, and its support under microgravity conditions will depend on the flow of substrates to the oxidative phosphorylation. It was established that the level of alterations in chloroplast ultrastructure under suboptimal light conditions was pronounced to a greater extent than under optimal light conditions. Based on the results, we suggest that the microgravity increases the negative effects of suboptimal lighting conditions in the primary metabolism of plants.

Key words: mitochondria, respiration, alternative oxidase, chloroplasts, ultrastructure, clinorotation.

УДК 581.17:582.34

О. В. Лобачевська, Я. Д. Хоркавців, Н. Я. Кияк, Н. А. Кіт, І. С. Данилків

Інститут екології Карпат Національної академії наук України, Львів

ΓΡΑΒΙΜΟΡΦΟΓΕΗΕ3 ΓΑΜΕΤΟΦΙΤΥ ΜΟΧΙΒ

Орієнтація росту бокових галузок протонеми визначається кутом нахилу відносно вектора земного тяжіння. Модуляція сигнальної системи ІОК і перерозподіл ауксину послаблює ендогенну протидію гравітропізму, посилюючи плагіотропний ріст. Рух ядра в клітинах протонеми корелює з ініціацією нової зони росту залежно від векторної сили тяжіння. Очевидно, в компетентних до галуження клітинах протонеми сигнал індукує швидше переміщення ядра і координує мітотичний поділ та ріст клітинної стінки. Гравіморфогенез апікальних клітин залежить як від спектрального складу світла, так і гормонального балансу. Модифікація ефекту світла кінетином підтверджує взаємодію фото- і гормональної систем гравірегуляції. Встановлено, що на гравічутливість апікальних клітин впливає значення pH. Протонема мохів адаптується до гравітації та інших екологічних чинників зміною морфологічної структури — збільшенням активності галуження, кількості бруньок і органів вегетативного розмноження та пришвидшенням їхнього розвитку.

Ключові слова: гравіморфогенез, фітогормони, світло.

Рослини коректують свій ріст відносно світла і гравітації завдяки фото- та гравітропізмам, що є визначальним для детермінації габітусу рослин. Форму галуження і орієнтацію росту латеральних гілок вищих рослин визначає гравізалежний кут нахилу гілок. Разом з іншими екологічними факторами гравітація впливає на біологію розвитку та репродуктивну стратегію бріофітів.

На світлі протонема мохів росте плагіотропно, орієнтуючись перпендикулярно до напряму освітлення і гравітації, утворюючи радіально симетричні дернини. У темряві формується густий пучок вертикальних столонів орієнтованих негативно гравітропно до напряму дії сили тяжіння. Диференціація клітин протонеми призводить до розвитку двох типів столонів — хлоронеми і каулонеми. Унаслідок поділів інтеркалярних клітин хлоронеми і каулонеми формуються бокові гілки, які ростуть і галузяться, утворюючи радіально симетричну протонемну дернину [6]. У природному середовищі протонема адаптується до впливу мінливих екологічних чинників зміною морфологічної структури — збільшенням інтенсивності галуження, пришвидшеним розвитком бруньок і органів вегетативного розмноження. У стресових умовах розвиток гаметофіту забезпечується підвищеною активністю реакцій антиоксидантного захисту [4]. Система клітин протонеми мохів функціонує як інтегрований орган, їхня диференціація і морфогенез гаметофіту перебувають під контролем світла і сили гравітації [2].

Габітус рослин визначається передусім типом галуження головних і бокових гілок різного порядку. Кут нахилу бокових гілок рослин визначають як фундаментальний детермінант форми, він залежить від поляризаційної дії гравітації і коректується ІОК. Це — загальнобіологічне явище і приклад самоорганізації розвитку, що контролює структурну специфіку кута впродовж періоду онтогенезу рослин [14, 16, 17, 21].

Апікальна клітина протонеми — автономна система синтезу ауксину, який дифундує разом

[©] ЮО. В. ЛОБАЧЕВСЬКА, Я. Д. ХОРКАВЦІВ, Н. Я. КИЯК, Н. А. КІТ, І. С. ДАНИЛКІВ, 2015

з іншими метаболітами інгібіторної дії в субапікальні клітини, створює там гальмівне поле, унаслідок чого галузиться 3-4-та клітина столону. Проаналізувано вплив ауксину та інгібітора ауксинового транспорту N-1-нафтил-фталамової кислоти (НФК) на величину гравізалежного кута нахилу латеральних галузок протонеми *Ceratodon purpureus* Brid.

У контролі майже всі клітини протонеми *С. ригригеиs* галузяться і кут гравізалежного згину змінюється вздовж головного столону. В апікальній частині столону у 3-5-й клітині кут малий — $30-40^\circ$, в наступних інтеркалярних клітинах величина гравітаційного згину зростає до $60-80^\circ$, і ріст латеральних галузок в основі столону унаслідок протидії гравітації стає майже плагіотропним (рис. 1).

Після дії 1,0 мкМ ауксину кут згину відносно вектора гравітації збільшувався майже на 20° (рис. 2), а НФК у концентрації 10 мкМ загальмовувала вплив ауксину, і кут зменшувався приблизно на 10°. Унаслідок порушення транспорту ауксину відновлювалися гравічутливість апікальних клітин і гравізалежний кут латеральних галузок протонеми. Ефективність впливу фітотропіну на величину кута згину підвищувалася у базальному напрямі, і кут зменшувався на 15— 20°. Очевидно, причиною нижчої гравічутливості і різної орієнтації бокових галузок вздовж столону є вміст ауксину, синтез якого зростав у клітинах, що галузяться, і в апікальних клітинах нових гілок.

Клиностатування стимулювало збільшення кута згину, тобто втрата поляризаційної дії гравітації інгібувала кут навіть більше, ніж ауксин. Отже, порушення вмісту або транспорту ауксину чи векторної дії гравітації призводило до зменшення протидії силі земного тяжіння, і в результаті — невертикального, майже плагіотропного росту латеральних гілок протонеми.

Отже, модуляція сигнальної системи IOK за участю інгібітора транспорту ауксину ефективно впливає на величину гравізалежного кута згину латеральних гілок, який визначається ендогенною протидією автотропного і гравітропного росту [2]. Мабуть, взаємодія тропізмів забезпечує перерозподіл ауксину і, відповідно, орієн-



Рис. 1. Зміна гравізалежного кута бокових галузок *Ceratodon purpureus* від апікальної до базальної частини гравітропного столону; довжина столону 4 мм



Рис. 2. Вплив фітогормонів на величину кута нахилу латеральних гілок *Ceratodon purpureus* в умовах сталої і зміненої гравітації: *1* — в контролі, *2* — в умовах клиностатування



Рис. 3. Напрям росту латеральних галузок на протонемі *Ceratodon purpureus* залежно від орієнтації векторів світла та гравітації: a — вектори паралельні, коефіцієнт галуження 25.6 ± 1.8 (після клиностатування 24.3 ± 1.7), δ — вектори перпендикулярні, коефіцієнт галуження 15.6 ± 1.1 (після клиностатування 22.8 ± 2.1)

тацію згину. У гравітропізмі протонеми мохів сигнальна система ауксину та іонів Ca²⁺ виконує поляризаційну функцію [8], тоді як для галуження та гравізалежного кута згину гілок ауксин є індуктором ростових процесів. Кут згину органу у певних екологічних умовах набуває особливого значення, щоб дістатися до джерел живлення поживних речовин та води у ґрунті чи світла на поверхні субстрату. Можливість розділити гравітропну і антигравітропну дію та визначити роль ауксин-сигнальної системи може бути вагомою експериментальною базою, щоб продовжити дослідження і сформувати концептуальну основу анізотропного росту латеральних пагонів.

Генератором галуження протонеми є ядро і підвищена функціональна активність клітин, в яких здійснюється диференціація і ріст. Найбільш ймовірно, що місце закладання ростка — процес стохастичний, а програма галуження клітин немає чіткої часової залежності. Однак експериментально можна ініціювати передумови для розвитку ростів та змінити іхню локалізацію залежно від орієнтації векторів світла і гравітації. Як під впливом світла, так і за участю гравітації у певній ділянці клітині відбувається структурна і функціональна поляризація, яка завдяки множинній взаємодії клітинних компонентів призводить до локального росту клітинної стінки. Ініціатором таких процесів є ядро, яке рухається до місця галуження, інколи транслокація ядра випереджує його.

Експериментально встановлено, що в апікальній клітині ядро не є статолітом, як амілопласти, і не переміщається до основи клітини, якщо вектор гравітації змінили на 180° [23]. Проте якщо активували галуження у темряві низькою (0.2 мкмоль· M^2c^{-1}) інтенсивністю червоного світла і одночасно змінили вектор гравістимуляції, гілки закладалися залежно від напряму дії гравітації (рис. 3). Приблизно на 2 год швидше і з обох боків клітинної стінки закладалися ростки на гравітропній протонемі, яка росла паралельно до вектора гравітації, порівняно з варіантом, коли вектор гравітації і напрям гравітропного росту не збігалися.

Очевидно, рух ядра знаходиться під дією гравітаційної сили, яка енергетично мобілізує транспортні системи для переміщення ядра [10, 18]. Часто ядро знаходилося у верхній частині клітини ще до того, як розпочався ріст клітинної стінки, інколи ядро продовжувало рухатися, а апекс галузки вже був чітко сформований (рис. 4). Частіше, аніж на протонемі зі світла, росток утворювався у верхній частині клітини гравітропної протонеми, майже під поперечною перетинкою. Таким чином, місце закладання латеральних галузок, яке можна розглядати як недетерміновану зону росту, модифікується впливом гравітаційної сили. Наразі механізми такого морфологічного ефекту вивчені мало.



Рис. 4. Розміщення ядер, зафарбованих DAPI, у клітинах *Ceratodon purpureus* під час ініціації і росту латеральних галузок: а — столон протонеми, в якій погалузилися 3-s - 5-а клітина, ядро біля основи галузки; б, в, e - клітини на стадії ініціації галуження, ядро міститься у зоні формування галузки і поділилося; $\partial - 3 - ядро поділилося, і дочірна$ $клітина галузки відділилася від материнської; <math>e, \epsilon - галузки утворилися у верхній і середній частині клітини, на світлі$ (контроль)

Невідомо, як відбувається ініціація зони росту галузки, але виявилось, що, де б росток не утворювався — саме туди із центра клітини в оточенні білків цитоскелету мігрує ядро. Локальне скупчення МТ цитоскелету знайдено у місці поділу клітини і формування ростка ще перед візуальним ростом клітинної стінки [11]. Чинниками, що визначають, чи буде клітина галузитися, є її розмір та поділ ядра. Поділ клітини латеральної галузки, як і апікальної клітини головного столону, відбувався за 8-9 год, тобто це та тривалість мітотичного поділу, яка підтримує стабільні (180-200 мкм) розміри клітин протонеми Ceratodon purpureus. В умовах мікрогравітації поділ та ріст клітин роз'єднані, а мітотичний цикл скорочується унаслідок змін тривалості періодів G₁ і G₂ [18], тому утворюються коротші клітини. Можна вважати, що мікрогравітація і зміна ве-

ною умовою, що впливає на механізми клітинного циклу і росту. Гравітропний ріст під час мітозу припиняється або ж настає короткотривала реверсія унаслідок реорганізації МТ цитоскелету, що порушує механізми перцепції гравістимулу [10]. Очевидно, це може бути однією з причин, чому клітинна стінка до завершення першого поділу росте перпендикулярно до материнської клітини і лише після цього стає чутливою до гравітації та відновлює гравізалежну вісь росту [9]. Експериментально встановлено, що процес

личини гравітаційної сили є стресовою екологіч-

експериментально встановлено, що процес закладання бруньок гаметофорів контролюється фітогормонами [2]. В умовах дії гравітації він істотно пришвидшується та проявляється у перетворенні апікальних клітин гравітропної протонеми у бруньки гаметофорів. Можливо, ключову роль відіграє напрямлена дія гравітації, яка зу-



Рис. 5. Вплив 16-год освітлення та кінетину на формування бруньок на гравітропній протонемі моху *P. nutans:* a — червоне світло, δ — синє світло, δ — зелене світло, c — 10^{-6} M кінетин

Таблиця 1. Вплив світла різного спектрального складу	
на формування бруньок гаметофорів на гравітропній протонемі P. nutan	S

Nº	During and in	Проаналізовано		Кількість бруньок	
	варіант досліду	гаметофорів	столонів	апікальних	субапікальних
1	Контроль (біле світло)	50	260	113	85
2	Червоне світло (16 год)	50	275	138	58
3	Синє світло (16 год)	50	320	34	45
4	Зелене світло (16 год)	50	255	26	38
5	Кінетин (10 ⁻⁶ М)	50	270	168	101
6	Кінетин (10 ⁻⁶ М) + зелене світло (16 год)	50	255	43	84

мовлює акропетальний транспорт фітогормонів та формування атрагувального центру у верхівковій клітині протонеми, а світло, як потужний морфогенетичний фактор, впливає на механізми ендогенної регуляції рослинного організму. На сьогодні встановлено фоторегуляторні системи червоного та синього світла, а зелене світло вважається фізіологічно неактивним. У зв'язку з цим проаналізовано ефект різних спектрів світла на утворення бруньок на гравітропній протонемі *Pohlia nutans* (Hedw). Lindb.

16-год освітлення гравітропної протонеми червоним світлом посилювало брунькоутворення порівняно з контролем. Бруньки з'являлися на одну добу швидше, і зростала їхня кількість насамперед на апікальних клітинах протонеми (табл. 1, рис. 5). Освітлення синім світлом інгібувало апікальне брунькоутворення, але натомість в апексі верхівкових клітин протонеми формувалися численні ростові ініціалі, з яких надалі розвивалися латеральні галузки (рис. 5, δ). Причиною різного ефекту червоного і синього світла може бути їхня взаємодія з фітогормонами. Одним із механізмів дії червоного світла є активізація акропетального клітинного транспорту цитокінінів. Можливо, під впливом червоного світла посилилася атрагувальна дія апексу верхівкових клітин протонеми, що індукувало підвищення вмісту цитокінінів і компетенцію клітин до формування апікальних бруньок. Синє світло, навпаки, руйнувало градієнтний апікальний розподіл фітогормонів та ініціювало брунькоутворення переважно вздовж гравітропних столонів.

Зелене світло пригнічувало ріст столонів, їхнє галуження та сповільнювало гравіморфо-

генез протонеми (табл. 2). Закладання бруньок на апікальних клітинах затримувалося на 5—6 днів порівняно з контролем, і більшість бруньок утворювалося на інтеркалярних клітинах. Зелене світло активує збільшення вмісту абсцизової кислоти і знижує рівень цитокінінів, ІОК та гіберелінів у клітинах [1], що, мабуть, інгібувало морфогенез протонеми *P. nutans*.

Екзогенний кінетин істотно стимулював формування бруньок на гравітропній протонемі. Їхня кількість зростала майже в 1.5 рази порівняно з контролем. Окрім того, на окремих столонах утворювалося по 2—4 бруньки з однієї апікальної клітини. У випадку спільного впливу кінетину і зеленого світла істотно зменшувався негативний вплив світла. Це означає, що в основі регуляторної морфогенетичної дії зеленого світла є зміна транспорту та перерозподіл фітогормонів в клітинах гаметофіту мохів.

Таким чином, світло різних ділянок спектра істотно впливало на гравіморфогенез протонеми *P. nutans*: червоне — активувало апікальне брунькоутворення, синє — пришвидшувало закладання бруньок переважно на інтеркалярних клітинах, зелене — інгібувало розвиток бруньок на клітинах протонеми. Модифікація кінетином ефекту світла свідчить, що гормональна система контролює фоторегуляцію морфогенезу мохів.

Важливим ендогенним чинником внутрішньоклітинного метаболізму є pH цитозолю. Відомо також, що зміна pH середовища на 1 од. призводить до зміни інтрацелюлярного pH_i на 0.1 од. [13]. Величина pH_i відіграє важливу роль на ранніх стадіях сприйняття гравістимулу [12]. Визначено, що зниження pH_i від 5.5 до 4.5 протягом перших 2 хв гравістимуляції у клітинах кореневого чохлика *Arabidopsis thaliana* впливало на гравііндукований сигналінг, який пов'язаний з Са²⁺-залежною регуляторною системою, цитоскелетом, ендоплазматичним ретикулюмом та активністю ферментів [15].

Встановлено, що оптимальним для реалізації гравітропної реакції *Р. пиtans* є pH 7.0 (табл. 3). Через 24 год після гравістимуляції підлужнення середовища до 9.0 призводило до зниження гравічутливості протонеми. Інгібувальний ефект на гравітропну реакцію протонеми *Р. пиtans* підвищувався і на середовища до 5.5 у статоцитах кореневого чохлика *Zea mays* гальмувало осідання амілопластів та знижувало гравічутливість коренів [15].

Важливу функціональну роль у реакції-відповіді на гравістимул виконує гваяколпероксидаза. Фермент локалізується у різних клітинних компартментах — цитозолі, вакуолях, клітинній стінці, задіяний у процесах росту і розвитку рослини, у реакціях стресу [20, 24]. Істотне підвищення пероксидазної активності у гравістимульованій протонемі *Р. nutans* встановлено як унаслідок збільшення, так і зменшення pH середовища (табл. 2). Найбільшу активність ферменту в гравітропній протонемі та найнижчий кут гравітропного згину визначено на середовищі з рН 4.5. Очевидно, функціональна лабільність ферменту в умовах порушення клітинного гомеостазу активує компенсаторні внутрішньоклітинні системи, що підтримують сенсорну систему перцепції гравісигналу при дії негативних чинників. Участь пероксидази у гравітропних реакціях клітин протонеми P. nutans може бути проявом адаптаційних реакцій гаметофіту до зміни величини рН субстрату.

Як і брунькоутворення, проявом гравіморфогенезу є спіральна форма протонемної дернинки

Таблиця 2. Вплив рН середовища на гравічутливість протонеми *P. nutans* та активність гваяколпероксидази у гравістимульованій протонемі

Варіант досліду	Довжина протонемних фрагментів, мкм	Кут згину протонеми, град	Активність гваяколпероксидази, відн. од. /г маси с.р. / с
pH 4.5	289.1 ± 1.7	27.1 ± 0.1^{-1}	74.5 ± 5.3
pH 7.0	735.2 ± 5.4	$67.3 \pm 0.5^{\circ}$	35.8 ± 2.1
pH 9.0	611.8 ± 4.8	41.2 ± 0.3	52.5 ± 2.2

	Кількість виводкових тілець, шт/дернину			
умови досліду	після гравістимуляції, у темряві	на світлі	після клиностатування	
Пролін, 1мМ	70 ± 1.3	65 ± 2.1	61 ± 3.3	
ПЕГ, 3%	84 ± 2.7	40 ± 2.5	56 ± 3.1	
ПЕГ, 5 %	18 ± 0.9	4 ± 0.4	9 ± 1.7	
Пролін + 5 % ПЕГ	50 ± 3.1	30 ± 2.8	32 ± 1.2	
Гравітропна протонема	60 ± 2.4	_	37 ±2.9	
Протонема зі світла	_	30 ± 2.0	_	

Таблиця 3. Вплив осмотично активних речовин на гравізалежне формування виводкових тілець на 20-денній протонемі Leptobryum piriiforme

мохів. Спіральність ініціюється нахилом клітинної перетинки під час мітозу апікальної клітини та диференціацією каулонеми з косими міжклітинними перетинками, що детермінує напрям спірального росту. Встановлено, що радіальний ріст протонемної дернини *Leptobryum pyriforme* Schimp. на низьких інтенсивностях білого світла і вищій концентрації середовища змінювався на спіральний фенотип дернини. Для одних видів мохів це граві-, для інших — світлозалежний морфогенез.

Окрім того, що гравітація та інші екологічні чинники беруть участь у регуляції морфогенезу бріофітів, земне тяжіння впливає на репродуктивну стратегію мохів. Мохи належать до групи толерантних до висушування рослин, здатних вегетативно розмножуватися в умовах водного дефіциту [7]. Важливою фізіологічною ланкою життєдіяльності рослин є гідротропізм. Дослідження гравічутливості коренів мутантних ліній Arabidopsis thaliana з низькою гідротропною реакцією свідчать, що такі рослини, на відміну від дикого типу, проявляють стійку гравітропну реакцію [22]. Завдяки взаємодії гідро- і гравітропізму корені A. thaliana в умовах низького водного потенціалу зазвичай проявляють високу гравічутливу реакцію і здатні підтримати водний режим клітин. У стресових умовах посухи осмотично активний пролін також сприяє підвищенню водного потенціалу клітин і зменшує рівень їхнього пошкодження [5].

Проаналізували вплив проліну і ПЕГ-6000 на гравізалежне утворення виводкових тілець у во-

логолюбного виду *Leptobryum piriforme* Schimp. Результати дослідження наведені у табл. 3. На гравітропній протонемі в усіх дослідах виводкових тілець утворювалося більше, ніж на світлі, а після кліностатування їх було менше, ніж в умовах сталої гравітації. Ефект проліну для гравітропної протонеми з темряви і протонеми, що росла на світлі, майже однаковий. З % ПЕГ, на відміну від проліну, істотніше впливав на розвиток виводкових тілець в умовах поляризаційної дії гравітації. Потенційно летальний вплив 5 % ПЕГ на утворення виводкових тілець у L. piriforme завдяки проліну значно зменшувався. Отже, гравітація активувала метаболічну активність клітин і формування виводкових тілець як органів запасання вуглеводів. У стресових природних умовах знезводнення (симульованого в експерименті 5 % ПЕГ) гравітація може мінімізувати негативний вплив дефіциту води і мати вирішальне значення для вегетативного розмноження. Безперечно, ефективність гравітації під час порушення водного режиму залежить від стадій онтогенезу і особливостей морфогенезу рослин моху [7].

Таким чином, гаметофітна стадія розвитку мохів адаптується до гравітації та інших екологічних чинників унаслідок зміни морфологічної структури — збільшення інтенсивності галуження, кількості бруньок і органів вегетативного розмноження та пришвидшення їхнього розвитку, переходу радіального росту в спіральний, а також функціональною пластичністю — лабільністю пероксидаз в умовах мінливого рН.

- Головацкая И. Ф. Регуляторная роль зеленого света в морфогенезе и гормональном балансе Arabidopsis thaliana (L.) Heynh. // Вестн. Томского гос. ун-та. — 2010. — № 8. — С. 43—57.
- 2. Демкив О. Т., Хоркавцив Я. Д., Кардаш А. Р. Полярность и клеточная дифференцировка в процессе развития архегониальных растений // Аналитические аспекты дифференцировки. — М.: Наука, 1991. — С. 121—132.
- Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Пундяк О. І. Гравітація як формотворчий фактор розвитку мохів // Фізіологія рослин: проблеми та перспективи розвитку. — Київ: Логос, 2009. — Т. 2. — С. 403—408.
- 4. *Кияк Н. Я.* Вплив іонів свинцю на ріст і окислювальний стрес гаметофіту *Funaria hygrometrica* Hedw. на різних стадіях розвитку // Чорноморський ботан. журн. 2012. **8**, № 2. С. 171—177.
- Клеточные механизмы адаптации растений к неблагоприятным воздействиям экологических факторов в естественных условиях / Е. Л. Кордюм, К. М. Сытник, В. В. Бараненко и др. — Киев: Наук. думка, 2003. — 277 с.
- Лазаренко А. С. Вибрані праці / Ред. кол.: М. А. Голубець, І. С. Данилків, О. Т. Демків та ін. — Львів, 2001. — 229 с.
- 7. Лобачевська О. В., Рабик І. В. Особливості вегетативного розмноження мохоподібних на відвалах сірчаного видобутку // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол. 2012. 60. С. 145—155.
- Хоркавців Я. Д., Демків О. Т. Вплив інгібіторів ауксинового транспорту на гравітропізм протонеми Pohlia nutans (Hedw.) // Космічна наука і технологія. 2003. 8. С. 77—82.
- Хоркавців Я. Д., Кияк Н. Я., Кіт Н. Я. Гравізалежний морфогенез мохів // 14-та укр. конф. з космічних досліджень. — Ужгород, Київ, 2014. — С. 71.
- Cove D., Bezanilla M., Harries Ph., Quatrano R. Mosses as model systems for the study of metabolism and development // Ann. Rev. Plant Biol. — 2006. — 57. — P. 497— 520.
- Demkiv O. T., Khorkavtsiv Ya. D., Pundiak O. I. Changes of protonemal cell growth related to cytoskeleton organization // Cell Biol. Int. – 2003. – 27. – P. 187–189.
- 12. Fasano J. M., Swanson S. J., Blancaflor E. B., et al. Changes in root cap pH required for the gravity response of the

Arabidopsis root // Plant Cell. — 2001. — **13**. — P. 907— 921.

- Felle H. Short-term pH regulation in plants // Plant Physiol. - 1988. - 74. - P. 583-591.
- Hangarter R. P. Gravity, light and plant form // Plant, Cell and Environment. – 1997. – 20. – P. 796–800.
- Johannes E., Collings D. A., Rink J. C., Allen N. S. Cytoplasmic pH dynamics in Maize pulvinal cells induced by gravity vector changes // Plant Physiol. – 2001. – 127. – P. 119–130.
- Kiss J. Z., Correll M. J., Mullen J. L., et al. Root phototropism: how light and gravity interact in shaping plant form // Grav. and Space Biol. – 2003. – 16. – P. 55–60.
- Kordyum E. L. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity // Plant Biology. – 2014. – 16, N 1. – P. 79–90.
- Medina F.-J., Herranz R. Microgravity environment uncouples cell growth and cell proloferation // Plant Signaling & Behavior. – 2010. – 5, N 2. – P. 176–179.
- Matía I., Conzález F., Herranz R. et al. Plant cell proliferation and growth are altered by microgravity conditions in spaceflight // J. Plant Physiol. – 2010. – 167. – P.184– 193.
- Prasad T. K., Anderson M. D., Stewart C. R. Localization and characterization of seroxidases in the mitochondria of chilling-acclimated maize seedlings // Plant Physiol. – 1995. – 108. – P. 1597–1605.
- Roychoudhry S., Bianco M. D., Kieffer M., et al. Auxin control gravitropic setpont angle in higher plant lateral branches // Current Biology. — 2013. — 23. — P. 1497— 1504.
- Takanashi N., Yamazaki Y., Kobayashi A., et al. Hydrotropism interacts with gravitropism by degrading Amyloplasts in Seedling Roots of Arabidopsis and Radish // Plant Physiol. – 2003. – 132, N 2. – P. 805–810.
- Schwuchow J. M., Kern V. D., White N. J., Sack F. Concervation of the plastid sedementation zone in all moss genera with known gravitropic protonemata // J. Plant Growth Regul. 2002. 21. P. 146–155.
- Vreeland V., Kwan N. Marine Algal Vanadium Peroxidase: Substratum Adhesion and Active recombinant Catalytic Domain // Thesisis of Conf. "Peroxidase 99" (July 17– 21, 1999, Columbus, Ohio USA). – Columbus, 1999. – P. 234–235.

Стаття надійшла до редакції 18.12.14

О. В. Лобачевская, Я. Д. Хоркавцив, Н. Я. Кияк, Н. А. Кит, И. С. Данылкив Институт экологии Карпат Национальной академии наук Украины, Львов

ГРАВИМОРФОГЕНЕЗ ГАМЕТОФИТА МХОВ

Ориентация роста латеральных ветвей протонемы определяется углом наклона относительно влияния силы тяжести. Модуляция сигнальной системы ИУК и перераспределение ауксина ослабляет эндогенное противодействие гравитропизму, усиливая плагиотропный рост. Движение ядра в клетках протонемы коррелирует с инициацией новой зоны роста и ветвления в зависимости от вектора силы тяжести. Вероятно, в компетентных к ветвлению клетках протонемы грависигнал способствует перемещению ядра и влияет на координацию митотического деления и роста клеточной стенки. На гравиморфогенез апикальных клеток влияет как спектральный состав света, так и баланс фитогормонов. Модификация эффекта света под действием кинетина подтверждает взаимовлияние фото- и гормональной систем гравирегуляции. Установлено, что гравичувствительность апикальных клеток изменяется в зависимости от значения рН среды. Протонема мхов адаптируется к гравитации и другим экологическим факторам в результате изменения морфологической структуры — увеличения активности ветвления, количества почек и органов вегетативного размножения, а также ускорения их развития.

Ключевые слова: гравиморфогенез, фитогормоны, свет.

O. V. Lobachevska, Ya. D. Khorkavtsiv, N. Ya. Kyyak, N. A. Kit, I. S. Danylkiv Institute of Ecology of the Carpathians of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

GRAVIMORPHOGENESIS GAMETOPHYTES OF MOSSES

The orientation of lateral branch growth is determined by the angle of inclination relative to the Earth's gravity vector. It was determined that modulation of IAA signal system and auxin redistribution reduces endogenous counteraction to gravitropism, increasing plagiotropic growth at the same time. Nucleus movement in protonemata cells correlates with the initiation of a new growth zone depending on gravity vector. Obviously, in the cells competent to branching protonemata the signal induces faster movement of the nucleus and coordinates mitotic division and growth of cell wall. Gravimorphogenesis of apical cells depends on the spectral composition of light and hormonal balance. Modification of light effect by kinetin confirms the interaction of photo- and hormonal graviregulation systems. It was established that pH₁ value has an effect on the gravisensitivity of apical cells. Protonema of mosses adapts to gravitation and other ecological factors by changing its morphological structure - increasing the branching activity and the number of buds and vegetative organs of reproduction and accelerating their development.

Key words: gravimorphogenesis, phytohormones, light.

УДК 523.3-36:523.43-36:577.112.384.4:577.175.82:612.815.1

А. Г. Назарова, Н. Г. Позднякова, О. О. Воронова, О. Ю. Чуніхін, М. В. Піскова, А. О. Пастухов, А. А. Борисов, Н. В. Крисанова, Т. О. Борисова Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, Київ

ОЦІНКА БІОМОДУЛЯТОРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА НЕЙРОТОКСИЧНОСТІ АНАЛОГУ МІСЯЧНОГО ҐРУНТУ

При вдиханні ультрадисперсні частинки місячного ґрунту затримуються в носовій порожнині та дихальних шляхах і можуть переноситись у центральну нервову систему. Нейротоксичний потенціал місячного ґрунту досі не оцінено. Дослідження були зосереджені на аналізі впливу аналогу місячного ґрунту на ключові характеристики глутаматергічної нейротрансмісії, оскільки порушення гомеостазу глутамату, головного збуджувального нейромедіатора в ЦНС, є одним з основних аспектів патогенезу багатьох нейрологічних захворювань. Аналог місячного ґрунту (JSC-1a, Lunar Soil Simulant, Orbitec, Medicoн, штат Вісконсин, США), а саме фракція нанорозмірних частинок, до і після обробки ультразвуком була охарактеризована методом фотонної кореляційної спектроскопії. З використанням міченого L-[¹⁴C]глутамату було показано, що у присутності аналога місячного ґрунту зростає зв'язування L-[¹⁴C]глутамату з ізольованими нервовими закінченнями головного мозку щурів (синаптосомами) в середовищі з низькою концентрацією Na⁺, внаслідок чого реєструється підвищення початкової швидкості накопичення L-[¹⁴C]глутамату нервовими закінченнями на 10% як у контрольних щурів, так і у тих, що зазнали гравітаційного навантаження. Ефект аналогу місячного ґрунту є унікальним і може призвести до зміни позаклітинного рівня глутамату, який є вкрай важливим для синаптичної передачі. Місячний ґрунт може мати шкідливий вплив на гомеостаз глутамату в центральній нервовій системі. Постійне подразнення від контакту з частинками ґрунту, особливо під час довгострокових місій, а також супутнє запалення, стрес, мікрогравітація, підвищена радіація, УФ-опромінення можуть посилити токсичний вплив ґрунту на організм людини.

Ключові слова: аналог місячного ґрунту, транспорт глутамату, глутаматергічна нейротрансмісія, нервові терміналі головного мозку.

ВСТУП

Пілотовані позаземні місії, які включають вихід у відкритий космос, вимагають оцінки ризику токсичності ультрадисперсного пилу. Було показано, що частинки місячного грунту сорбуються на скафандрах і потрапляють всередину космічних кораблів [35, 38]. В результаті прямого контакту з частинками місячного пилу у астронавтів протягом декількох місій «Ароllo» спостерігалось подразнення очей, дихальних шляхів та шкіри.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

Формування, склад і фізичні властивості місячного пилу та його вплив на здоров'я людини недостатньо охарактеризовані [28], хоча шкідливий вплив частинок місячного пилу на тканини, що безпосередньо зазнавали його дії, описувався в роботах [24, 25, 35]. В організмі ссавців ультрадисперсні частинки можуть тривалий час зберігатись в носовій порожнині, бронхах та альвеолах за рахунок дифузії, і окрім перерозподілу між різними органами транспортуватися вздовж сенсорних аксонів нюхового нерва до центральної нервової системи (ЦНС) [20, 30, 32, 34, 39]. В роботі [32] показано, що інтраназально введені тверді ультрадисперсні частинки (<100 нм)

[©] А. Г. НАЗАРОВА, Н. Г. ПОЗДНЯКОВА, О. О. ВОРОНОВА, О. Ю. ЧУНІХІН, М. В. ПІСКОВА, А. О. ПАСТУХОВ, А. А. БОРИСОВ, Н. В. КРИСАНОВА, Т. О. БОРИСОВА, 2015

після осідання на слизовій оболонці носоглотки можуть транспортуватись у ЦНС через нюховий нерв. У шурів приблизно 20 % ультрадисперсних частинок, що осідають на слизовій оболонці, можуть переміщатися до нюхової цибулини мозку. Це може забезпечити шлях надходження ультрадисперсних частинок в ЦНС в обхід гемато-енцефалічного бар'єру [32]. Наночастки ТіО, були виявлені в мозку 6-тижневих мишей після підшкірного введення їх вагітним самкам [36]. Було показано, що крім головного мозку ультрадисперсні частинки можуть накопичуватися у печінці протягом 4-24 год після контакту [9, 32]. Тверді частинки можуть потрапляти у клітини шляхом ендоцитозу [17, 40]. Однак Гейзер з співробітниками [18] припустили, що іп vitro поглинання ультрадисперсних частинок в клітинах відбувається шляхом дифузії або адгезії, а не за допомогою жодного з очікуваних типів ендоцитозу. Ці частинки проникають крізь клітинні мембрани без фагоцитозу в легенях і в культурі клітин. У клітинах вони знаходяться у незв'язаній з мембраною формі і можуть безпосередньо взаємодіяти з внутрішньоклітинними білками, органелами і ДНК, що може значно підвищити їхній токсичний потенціал [18].

Нейротоксичну дію місячного ґрунту досі не оцінено. Тривалість дії пилу під час довгострокової місії, особливо у поєднанні з іншими шкідливими для людини факторами, зокрема мікрогравітацією, радіацією, ультрафіолетом і т. д., може посилити його шкідливий вплив. Було продемонстровано, що місячний пил, а також тверді наночастинки є причиною запалення [9, 10], яке, як відомо, може змінювати проникність гематоенцефалічного бар'єру [1]. Основне питання, яке було поставлене в роботі, чи може місячний пил викликати розвиток патологічних процесів, які обумовлюють нейротоксичність? У нашому дослідженні оцінку нейротоксичних ризиків для здоров'я від впливу аналогу місячного ґрунту (JSC-1a, Lunar Soil Simulant, Orbitec, Медісон, штат Вісконсин, США) проводили відповідно до рекомендацій з оцінки ризику нейротоксичності (US Environmental Protection Agency, 1998 року, згідно з пунктом 3 Оцінка небезпеки: 3.1.2 Дослідження на тваринах; 3.1.2.3 Нейрохімічні наслідки нейротоксичності; 3.1.3.4. *In vitro* дані нейротоксикології) [7]. Методологічні підходи передбачали дослідження *in vitro* безпосереднього впливу аналогу місячного ґрунту на ключові характеристики глутаматергічної нейротрансмісії, зокрема на поглинання глутамату, основного збуджувального нейромедіатора в ЦНС [2—8, 13, 21—23, 37], нервовими закінченнями головного мозку при участі високоафінних Na⁺-залежних транспортерів.

МЕТОДИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Краніо-каудальне гіпергравітаційне навантаження (1 год, 10g) статевозрілих самців щурів Wistar вагою 100—120 г проводили у спеціально сконструйованій та виготовленій центрифузі з діаметром ротора 5.5 м, яка розташована у відділі нейрохімії Інституту. У дослідженнях використовували препарат ізольованих нервових терміналей, одержаних послідовним диференційним центрифугуванням і центрифугуванням у градієнті густини фіколу-400 (Sigma) [12]. Концентрацію білку визначали за методом Ларсона з співробітниками [26]. Накопичення глутамату синаптосомами оцінювали з використанням L-[¹⁴С]глутамату (Amersham). Процес накопичення ініціювали додаванням 420 нМ L-[¹⁴C]глутамату (0.1 мкКі/мл), інкубували 1-10 хв при 37 °С. Аліквоти суспензії відбирали та обробляли двома способами: пропускали крізь скловолоконні фільтри Whatman GF/C (для синаптосом) або центрифугували на мікроцентрифузі «Eppendorf» протягом 20 с за 10000 g. Накопичення L-[14C]глутамату визначали у аліквотах супернатанту та осаду в сцинтиляційній рідині OCS або ACS (Amersham) на лічильнику Tracor Analytic Delta 300 (CIIIA) [8].

РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз аналогу місячного ґрунту та синаптосом методом фотонної кореляційної спектроскопії. Методом лазерної кореляційної спектроскопії було проведено визначення середнього діаметра та функції розподілу за розміром частинок аналогу місячного ґрунту та ізольованих нервових терміналей до та після гравітаційного навантаження. Визначення проводили за допомогою лазер-



Рис. 1. Розподіл кількості N частинок аналога місячного ґрунту по значеннях їхнього діаметра d у суспензії (2 мг/мл) в стандартному сольовому розчині (на основі п'яти вимірювань по 1 хв) методом фотонної кореляційної спектроскопії: a — суспензія аналога місячного ґрунту до (a) та після обробки (b) ультразвуком (22 кГц, 1 хв), δ — фракція частинок з малим діаметром у суспензії аналога до (δ) та після обробки (c) ультразвуком

ного кореляційного спектрометра "ZetaSizer-3" (Malvern Instrument, Великобританія), обладнаного корелятором (multi computing correlator type 7032 ce).

Середній розмір частинок у суспензії аналогу ґрунту в стандартному сольовому розчині був розрахований на основі п'яти вимірювань, кожне протягом 1 хв і становив 2500 ± 336 нм

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

для частинок аналога місячного грунту (рис. 1). Крім того, у препараті аналога була виявлена фракція частинок з малим розміром (приблизно 50—60 нм) (рис. 1, δ). Для більш детального аналізу аналог піддавався обробці ультразвуком при 22 кГц протягом 1 хв, після чого розмір частинок знижувався більш ніж у два рази для аналога місячного пилу і складав 1110 ± 67 нм (рис. 1, ϵ).

В експериментах використовувались ізольовані нервові закінчення (синаптосоми) мозку контрольних шурів та шурів, що зазнали гіпергравітаційного навантаження. Одержані результати вказують, що препарат синаптосом містить частинки розміром від 0.2 до 20 мкм, однак переважна більшість частинок має розміри від 1.5 до 10 мкм, а середній діаметр синаптосом складає 3.24 ± 0.45 мкм як у контролі, так і в умовах гравітаційного навантаження (рис. 2).



Рис. 2. Аналіз препарату синаптосом методом лазерної кореляційної спектроскопії: a — синаптосоми, одержані від контрольних тварин, δ — синаптосоми, одержані від тварин, що зазнали гіпергравітаційного навантаження. Наведено типовий графік, вимірювання проводили з використанням трьох препаратів синаптосом



Рис. 3. Активне накопичення L-[¹⁴C]глутамату синаптосомами у часі при відсутності (сірі стовпчики) та при наявності (чорні стовпчики) аналога місячного грунту (2 мг/мл). Накопичення ініціювали внесенням 10 мкМ глутамату (з 420 нМ L-[¹⁴C]глутамату) (0.1 мкКі/мл) до суснезії синаптосом (0.2 мг/мл білка). Проби інкубували при 37 °C протягом 1, 2 та 10 хв та швидко осаджували. Результати представлені як середнє значення ± SEM на основі шести незалежних експериментів ($P \le 0.05$ відносно контролю у відповідний проміжок часу, *t*-тест Стьюдента)

Таким чином, аналог місячного грунту містить частинки, розмір яких був у тому ж діапазоні та нижче, ніж розмір нервових закінчень, що обумовлює можливість їхньої взаємодії з плазматичною мембраною синаптосом та впливу на функціонування мембранних білків.

Оцінка зв'язування L-[¹⁴C]глутамату з аналогом місячного ґрунту. Ми проаналізували чи може L-[¹⁴C]глутамат сорбуватись на поверхні аналога ґрунту. Це важливо, оскільки зниження концентрації L-[¹⁴C]глутамату в інкубаційному середовищі за рахунок сорбції може вплинути на точність визначення початкової швидкості накопичення L-[14C]глутамату синаптосомами. Враховуючи наші дані про розмір частинок аналогу місячного ґрунту (рис. 1), ми використовували фільтр Millipore (0.45 мкм) для їхнього відокремлення. У експериментах аналог ґрунту інкубували з 10 мкМ L-[¹⁴C]глутамату у стандартному сольовому розчині протягом 10 хв, а потім фільтрували через фільтр і промивали 3 мл стандартного сольового розчину. Було виявлено, що радіоактивність на фільтрах у присутності та відсутності аналогу була однаковою, отже аналог не сорбує L-[¹⁴C]глутамат на своїй поверхні. Таким чином, наявність аналогу пилу не змінює концентрацію L-[¹⁴C]глутамату в середовищі інкубації.

Накопичення L-[14С]глутамату синаптосомами у присутності аналогу місячного ґрунту. Показано (рис. 3), що у присутності аналогу ґрунту збільшувалась початкова швидкість накопичення L-[¹⁴C]глутамату приблизно на 10 %, що склало 2.5 ± 0.08 нмоль \cdot хв⁻¹мг⁻¹ білка в контрольних синаптосомах і 2.79 ± 0.08 нмоль хв⁻¹мг⁻¹ білка в синаптосомах у присутності аналога місячного ґрунту ($P \le 0.05$, *t*-тест Стьюдента, n = 6) (рис. 3). Накопичення L-[¹⁴C]глутамату синаптосомами за 10 хв складало 4.8 ± 0.09 нмоль хв⁻¹мг⁻¹ білка в контролі та підвищувалось до 5.35±0.15 нмоль× ×хв-1мг-1 білка під впливом аналога місячного ґрунту (P ≤ 0.05, *t*-тест Стьюдента, n = 6). Аналог пилу посилював початкову швидкість накопичення L-[¹⁴C]глутамату синаптосомами після гравітаційного навантаження також на 10 %.

Оксид заліза є одним з основних компонентів місячного ґрунту. Тому ми використали синтетичні наночастинки магнетиту як додатковий контроль. Було виявлено, що синтетичні наночастинки не впливають на початкову швидкість поглинання L-[¹⁴C]глутамату в ізольованих нервових закінченнях. Таким чином, здатність змінювати поглинання глутамату є особливістю, що притаманна тільки аналогу місячного ґрунту.

Зв'язування L-[14С]глутамату з нервовими закінченнями у присутності аналога місячного ґрунту. Одним з факторів, який може впливати на початкову швидкість поглинання L-[¹⁴C]глутамату синаптосомами, є зміна неспецифічного зв'язування L-[¹⁴C]глутамату. Оскільки Na⁺/K⁺електрохімічний градієнт є рушійною силою для активного транспорту глутамату, зниження позаклітинної концентрації Na⁺ пригнічує роботу транспортерів глутамату і дозволяє оцінити зв'язування L-[¹⁴C]глутамату з плазматичною мембраною синаптосом. Слід зазначити, що стандартний сольовий розчин містить 126 мМ Na⁺. Позаклітинний Na⁺ був повністю замінений одновалентним органічним катіоном N-метил-Dглюкаміном і з'ясувалось, що у присутності аналогу місячного ґрунту зв'язування L-[¹⁴C]глутамату (10 мкМ) з синаптосомами за 1 хв зростало з 0.05 \pm 0.015 нмоль/мг білка в контролі до 0.15 \pm \pm 0.02 нмоль/мг білка у присутності аналога місячного ґрунту і за 10 хв суттєво не змінювалось ($P \le 0.05$, *t*-тест Стьюдента, n = 6) (рис. 4).

Ми з'ясували, що наявність аналогу місячного пилу у середовищі інкубації суттєво не впливає на вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових закінчень до та після гравітаційного навантаження. Також виявилось, що місячний пил не змінює ацидифікацію синаптичних везикул у нервових терміналях, ізольованих з головного мозку щурів, що зазнали гравітаційного навантаження.

Обговорення результатів дослідження. Вплив місячного ґрунту на тканини, які опосередковано зазнають його дії, є малодослідженим питанням. Водночас експериментальні дані вказують на те, що місячний пил може бути шкідливим для здоров'я людини. Ультрадисперсні частинки не тільки ефективно затримуються в носовій порожнині та дихальних шляхах, але і транспортуються та перерозподіляються між різними органами [9, 30, 32, 34, 39]. Показано, що після вдихання ультрадисперсні частинки можуть долати гемато-енцефалічний бар'єр в деяких ділянках мозку [32], причому 20 % з них осідають на слизовій оболонці носа і можуть переміщатися до нюхової цибулини. Тверді частинки можуть переноситися через плазматичну мембрану у клітину шляхом ендоцитозу [17, 40] або інших механізмів [18]. На основі наших даних, отриманих за допомогою фотонної кореляційної спектроскопії, показано існування фракції частинок з малим розміром в аналозі місячного ґрунту. Це дозволяє припустити, що ендоцитоз може бути одним з механізмів, за допомогою якого компоненти місячного ґрунту можуть потрапляти всередину нервових закінчень.

У цьому дослідженні було оцінено вплив аналогу місячного ґрунту на ключовий процес, що лежить у основі синаптичної передачі. Вплив аналогу місячного ґрунту на зв'язування L-[¹⁴C] глутамату в нервових закінченнях було проаналізовано в умовах, коли Na⁺-залежне накопичення глутамату значно пригнічене. Для цих цілей ми використовували середовище з низькою



Рис. 4. Зв'язування L-[¹⁴C]глутамату з синаптосомами в середовищі з низькою концентрацією Na⁺ за відсутності (*1*) та у при наявності (*2*) аналога місячного грунту (2 мг/мл)

концентрацією Na⁺. Встановлено, що за цих умов аналог місячного ґрунту викликав статистично вірогідне збільшення зв'язування L-[¹⁴C] глутамату в нервових закінченнях (рис. 4). Зміни зв'язування L-[14C]глутамату впливають на визначене значення початкової швидкості Na⁺-залежного транспорту L-[14C]глутамату, за рахунок чого спостерігалось помітне збільшення початкової швидкості у присутності аналога місячного ґрунту. Збільшення зв'язування глутамату може змінити позаклітинний рівень нейромедіатора у мозку. Беручи до уваги значну поверхню нервових закінчень в мозку, такі зміни можуть бути достатніми, щоб змінити концентрацію глутамату в міжклітинній рідині мозку. Підтримання гомеостазу глутамату, який є вкрай важливим для синаптичної передачі у мозку, за таких умов може бути порушено.

Наші дані також представляють інтерес з точки зору мембранології. Неясно, який тип взаємодії відбувається між частинками аналога місячного ґрунту та плазматичною мембраною нервових закінчень без зміни цілісності мембрани та мембранного потенціалу, який в той же час підвищує зв'язування глутамату. Слід підкреслити, що цей ефект є специфічним для аналога місячного ґрунту. Ми припустили, що це може бути пов'язано з деякими особливостями аналога місячного ґрунту у порівнянні з іншими частинками. Місячний пил складається з агглютинатів з гострими зубчастими краями, які можуть більш ефективно взаємодіяти з поверхнею мембрани та викликати патологічні зміни. Крім того, місячний пил має значну реакційну поверхню, високий вміст металічного заліза та велику площу поверхні за рахунок пористості. Ми припустили, що збільшення зв'язування глутамату з нервовими закінченнями у присутності аналога місячного ґрунту може бути пов'язано зі змінами на поверхні плазматичної мембрани.

Складність дослідження впливу місячного ґрунту полягає у тому, що він складається з суміші різних частинок, кожна з яких може діяти на клітини за власним механізмом. Дослідження ранніх нейротоксичних ефектів від вдихання повітря з домішками алюмінію і/або марганцю, показали, що субклінічні неврологічні симптоми і низький рівень фосфоліпід-зв'язувального білка Clara cell protein CC16 можуть бути пов'язані з інтерналізацією іонів алюмінію в ліпідну фракцію епітелію легень, що в свою чергу може допомогти іонам алюмінію подолати гемато-енцефалічний бар'єр [19]. Оксид заліза викликає загибель клітин внаслідок пошкодження мембрани, а кремнезем викликає розвиток запалення без значної загибелі як ракових, так і нормальних клітин [11]. Основні компоненти місячного ґрунту, зокрема FeO, Fe₂O₃, MnO, є, з одного боку, мікроелементами, які необхідні для росту і функції мозку, а з іншого боку — нейротоксичними сполуками з тяжкими наслідками для здоров'я людини [7]. Таким чином, наявність потенційно токсичних металів у складі місячного ґрунту повинна бути прийнята до уваги при оцінці ризику нейротоксичності.

В місячній екзосфері фізичні та хімічні властивості місячного ґрунту можуть змінюватись під впливом ряду специфічних факторів (підвищена радіація, низька гравітація, ультрафіолет і т. д.). Унікальні особливості місячного ґрунту полягають в особливих умовах його формування при тривалому впливі на нього опромінення у безкисневій атмосфері. Ці особливості обумовлюють високу токсичність місячного ґрунту, яка перевищує токсичність аналогів, що походять з матеріалів, одержаних на Землі [16]. В умовах Місяця пил перебуває у первісному стані, що зберігає реакційну здатність поверхні частинок [28]. Крім того, властивості ґрунту відрізняються в різних регіонах Місяця і повне розуміння хімічної реактивності можливе лише при *in situ* аналізі, щоб мати уявлення про типи реакцій, які проходять при взаємодії ґрунту з органічними молекулами в умовах Місяця [29].

Контакт з частинками грунту викликає подразнення і запалення, а стрес, мікрогравітація, ультрафіолет та радіація в умовах in situ можуть посилити шкідливу дію ґрунту на організм ссавців. Було чітко продемонстровано, що місячний пил, а також тверді наночастинки викликають запалення [9, 10]. Обробка альвеолярних макрофагів аналогами місячного та марсіанського ґрунту показала дозозалежне підвищення цитотоксичності, викликане пошкодженням переважно субпопуляції клітин супресорів, що загалом призводить до збільшення співвідношення кількості активаторів (RFD1+) та супресорів (RFD1+7+) [27]. Помітного збільшення відсотка нейтрофілів не спостерігалось в жодній з груп через 4 год після обробки аналогом ґрунту, але виявлялось у всіх оброблених групах після 24 год. Це спостереження вказує на те, що пил не володіє гострою токсичністю, ефект був поступовим, а для нейтрофілів потрібен деякий час для спрямування та накопичення в легенях [25]. За даними [24] гострі наслідки дії ґрунту в легенях вказують на те, що місячний пил є більш токсичним, ніж ТіО,. Під час довгострокових місій збільшиться і тривалість впливу позаземного пилу. В роботі [25] було показано, що при збільшенні тривалості знаходження аналогів місячного та марсіанського ґрунту в легенях від 7 до 90 днів, гострі запальні реакції переходять у хронічне запальне ураження. Ушкодження легень були більш тяжкими при попередній обробці аналогів ґрунту озоном. Вплив озону на аналог місячного ґрунту був неадитивним [25]. За умов мікрогравітації: 1) відкладення в легенях людини частинок діаметром 1 мкм не зменшувалось, 2) функції макрофагів у тому числі процес фагоцитозу були пригнічені, 3) реакції запалення в легенях змінювались [31]. Внаслідок зменшення осідання частинок пилу за умов мікрогравітації ризик їхнього вдихання збільшується. Частинки, що вдихаються, відкладаються в леге-
нях і можуть зберігатись там протягом тривалого часу [14, 33]. Вдихання частинок різного розміру може негативно впливати на дихальну і серцевосудинну систему внаслідок запалення дихальних шляхів [15]. Запропоновано кілька сигнальних механізмів, які можуть брати участь у реакціях запалення і пов'язані з цитотоксичністю ґрунту. Дослідження залежності концентрація-ефект аналогів місячного ґрунту було проведено на лінії макрофагів мишей мRAW 264.7. Результати показали, що аналог місячного ґрунту в концентрації 50—2000 мкг/мл викликає підвищення експресії індуцибельної NO-синтази [10].

У нашому дослідженні виявилось, що аналог місячного ґрунту спричинює збільшення зв'язування глутамату з ізольованими нервовими закінченнями, що може порушити гомеостаз глутамату в головному мозку, вкрай необхідний для синаптичної передачі. Постійне подразнення частинками ґрунту під час довгострокових місій, запалення, стрес та інші шкідливі фактори, зокрема мікрогравітація, підвищена радіація, ультрафіолет і т. д., можуть посилити шкідливі нейрологічні наслідки. Дослідження аналогів місячного ґрунту може відкрити нові засоби профілактики захворювань шляхом усунення або зменшення нейротоксичних ризиків.

- Abbott N. J. Inflammatory mediators and modulation of blood-brain barrier permeability // Cell. Mol. Neurobiol. - 2000. - 20. - P. 131-147.
- 2. *Borisova T., Himmelreich N.* Centrifuge-Induced Hypergravity: [³H]GABA and L-[¹⁴C]glutamate Uptake, Exocytosis and Efflux Mediated by High-Affinity, Sodium-Dependent Transporters // Adv. Space Res. — 2005. — **36**. — P. 1340—1345.
- Borisova T., Kasatkina L., Ostapchenko L. The proton gradient of secretory granules and glutamate transport in blood platelets during cholesterol depletion of the plasma membrane by methyl-beta-cyclodextrin // Neurochem. Int. – 2011. – 59. – P. 965–975.
- 4. *Borisova T., Krisanova N.* Presynaptic transporter-mediated release of glutamate evoked by the protonophore FCCP increases under altered gravity conditions // Adv. Space Res. 2008. 42. P. 1971–1979.
- Borisova T., Krisanova N., Himmelreich N. Exposure of animals to artificial gravity conditions leads to the alteration of the glutamate release from rat cerebral hemispheres nerve terminals // Adv. Space Res. - 2004. - 33. -P. 1362-1367.

- Borisova T., Krisanova N., Sivko R., Borysov A. Cholesterol depletion attenuates tonic release but increases the ambient level of glutamate in rat brain synaptosomes // Neurochem. Int. 2010. 56. P. 466–478.
- 7. *Borisova T., Krisanova N., Sivko R., et al.* Presynaptic malfunction: The neurotoxic effects of cadmium and lead on the proton gradient of synaptic vesicles and glutamate transport // Neurochem. Int. 2011. **59**. P. 272–279.
- Borisova T., Sivko R., Borysov A., Krisanova N. Diverse presynaptic mechanisms underlying methyl-beta-cyclodextrin-mediated changes in glutamate transport // Cell. Mol. Neurobiol. – 2010. – 30. – P. 1013–1023.
- Bourdon J. A., Saber A. T., Jacobsen N. R., et al. Carbon black nanoparticle instillation induces sustained inflammation and genotoxicity in mouse lung and liver // Part. Fibre. Toxicol. – 2012. – 9-5.
- Chatterjee A., Wang A., Lera M., Bhattacharya S. Lunar soil simulant uptake produces a concentration-dependent increase in inducible nitric oxide synthase expression in murine RAW 264.7 macrophage cells // J. Toxicol. Environ. Health A. – 2010. – 73. – P. 623–636.
- Choi S. J., Oh J. M., Choy J. H. Toxicological effects of inorganic nanoparticles on human lung cancer A549 cells // J. Inorg. Biochem. – 2009. – 103. – P. 463–471.
- Cotman C. W. Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions // Meth. Enzymol. 1974. 31. – P. 445–452.
- Danbolt N. C. Glutamate uptake // Prog. Neurobiol. 2001. – 65. – P. 1–105.
- Darquenne C., Prisk G. Deposition of inhaled particles in the human lung is more peripheral in lunar than in normal gravity // Eur. J. Appl. Physiol. – 2008. – 103. – P. 687–695.
- Frampton M. W., Stewart J. C., Oberdorster G., et al. Inhalation of ultrafine particles alters blood leukocyte expression of adhesion molecules in humans // Environ. Health Perspect. – 2006. – 114. – P. 51–58.
- 16. *Fubini B., Fenoglio I.* Toxic potential of mineral dusts // Elements. 2007. **3**. P. 407–414.
- Garred Ø., Rodal S. K., van Deurs B., Sandvig K. Reconstitution of clathrin-independent endocytosis at the apical domain of permeabilized MDCK II cells: requirement for a Rho-family GTPase // Traffic. 2001. 2. P. 26—36.
- Geiser M., Rothen-Rutishauser B., Kapp N., et al. Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells // Environ. Health. Perspect. – 2005. – 113. – P. 1555–1560.
- Halatek T., Sinczuk-Walczak H., Rydzynski K. Early neurotoxic effects of inhalation exposure to aluminum and/or manganese assessed by serum levels of phospholipid-binding Clara cells protein // J. Environ. Sci. Health. A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. 2008. 43. P. 118–124.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 4

- Kao Y. Y., Cheng T. J., Yang D. M. Demonstration of an olfactory Bulb—Brain translocation pathway for ZnO nanoparticles in rodent cells in vitro and in vivo // J. Mol. Neurosci. – 2012. – 48. – P. 464–471.
- Kasatkina L., Borisova T. Impaired Na⁺-dependent glutamate uptake in platelets during depolarization of their plasma membrane // Neurochem. Int. – 2010. – 56. – P. 711–719.
- Krisanova N., Sivko R., Kasatkina L., Borisova T. Neuroprotection by lowering cholesterol: A decrease in membrane cholesterol content reduces transporter-mediated glutamate release from brain nerve terminals // Biochim. Biophys. Acta. Mol. Bas. Dis. 1822. – 2012. – 1. – P. 553–1561.
- Krisanova N., Trikash I., Borisova T. Synaptopathy under conditions of altered gravity: Changes in synaptic vesicle fusion and glutamate release // Neurochem. Int. – 2009. – 55. – P. 724–731.
- Lam C. W, James J. T, Latch J. N, et al. Pulmonary toxicity of simulated lunar and Martian dusts in mice: II. Biomarkers of acute responses after intratracheal instillation // Inhal. Toxicol. – 2002. – 14. – P. 917–928.
- Lam C. W., James J. T., McCluskey R., et al. Pulmonary toxicity of simulated lunar and Martian dusts in mice: I. Histopathology 7 and 90 days after intratracheal instillation // Inhal. Toxicol.— 2002. — 14. — P. 901—916.
- Larson E., Howlett B., Jagendorf A. Artificial reductant enhancement of the Lowry method for protein determination // Anal. Biochem. 1986. 155. P. 243–248.
- Latch J. N., Hamilton R. F. Jr., Holian A., et al. Toxicity of lunar and martian dust simulants to alveolar macrophages isolated from human volunteers // Inhal. Toxicol. – 2008. – 20. – P. 157–165.
- Linnarsson D., Carpenter J., Fubini B., et al. Toxicity of lunardust // Planet. and Space Sci. — 2012. — doi.org/ 10.1016/j.pss.2012.05.023.
- Loftus D. J., Rask J. C., McCrossin C. G., Tranfield E. M. The chemical reactivity of lunar dust: from toxicity to astrobiology physics and astronomy // Earth, Moon, and Planets. – 2010. – 107. – P. 95–105.

- Mikawa M., Kato H., Okumura M., et al. Paramagnetic water-soluble metallofullerenes having the highest relaxivity for MRI contrast agents // Bioconjug. Chem. – 2001. – 12. – P. 510–514.
- Morimoto Y., Miki T., Higashi T., et al. [Effect of lunar dust on humans: -lunar dust: regolith-] // Nihon Eiseigaku Zasshi. – 2010. – 65. – P. 479–485.
- Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., et al. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain // Inhal. Toxicol. – 2004. – 16. – P. 437–445.
- Peterson J. B., Prisk G. K., Darquenne C. Aerosol deposition in the human lung periphery is increased by reduced-density gas breathing // J. Aerosol. Med. Pulm. Drug Del. 2008. 21. P. 159–168.
- 34. Qingnuan L., Yan X., Xiaodong Z., et al. Preparation of (99m)Tc-C(60)(OH)(x) and its biodistribution studies // Nucl. Med. Biol. – 2002. – 29. – P. 707–710.
- Rehders M., Grosshäuser B. B., Smarandache A., et al. Effects of lunar and mars dust simulants on HaCaT keratinocytes and CHO-K1 fibroblasts // Adv. Space Res. 2011. 47. P. 1200–1213.
- Takeda K., Suzuki K. I., Ishihara A., et al. Nanoparticles transferred from pregnant mice to their offspring can damage the genital and cranial nerve systems // J. Health. Sci. – 2009. – 55. – P. 95–102.
- Tarasenko A. S., Sivko R. V., Krisanova N. V., et al. Cholesterol depletion from the plasma membrane impairs proton and glutamate storage in synaptic vesicles of nerve terminals // J. Mol. Neurosci. 2010. 41. P. 358–367.
- Wallace W. T., Tayler L. A., Liu Y., et al. Lunar dust and lunar simulant activation and monitoring // Meteorit. Planet. Sci. – 2009. – 44. – P. 961–970.
- Wang H., Wang J., Deng X., et al. Biodistribution of carbon single-wall carbon nanotubes in mice // J. Nanosci. Nanotech. – 2004. – 4. – P. 1019–1024.
- 40. *Xia T., Kovochich M., Liong M., et al.* Cationic polystyrene nanosphere toxicity depends on cell-specific endocytic and mitochondrial injury pathways // ACS Nano. — 2008. — **2**. — P. 85—96.

Стаття надійшла до редакції 12.12.14

А. Г. Назарова, Н. Г. Позднякова, О. А. Воронова, А. Ю. Чунихин, М. В. Пискова, А. О. Пастухов, А. А. Борисов, Н. В. Крисанова, Т. А. Борисова

Институт биохимии им. А. В. Палладина Национальной академии наук Украины, Киев

ОЦЕНКА БИОМОДУЛЯТОРНЫХ СВОЙСТВ И НЕЙРОТОКСИЧНОСТИ АНАЛОГА ЛУННОГО ГРУНТА

При вдыхании ультрадисперсные частицы лунного грунта задерживаются в носовой полости и дыхательных путях и могут переноситься в центральную нервную систему. Нейротоксический потенциал лунного грунта до сих пор не оценен. Исследование было сосредоточено на анализе влияния аналога лунного грунта на ключевые характеристики глутаматергической нейротрансмиссии, поскольку нарушение гомеостаза глутамата, основного возбуждающего нейромедиатора в центральной нервной системе, является одним из основных аспектов патогенеза многих нейрологических заболеваний. Аналог лунного грунта (пыли) (JSC-1a, Lunar Soil Simulant, Orbitec, Мэдисон, штат Висконсин, США), а именно фракция наноразмерных частиц, до и после обработки ультразвуком была охарактеризована методом фотонной корреляционной спектроскопии. При использовании меченого L-[14C]глутамата было показано, что в присутствии аналога лунного грунта возрастает связывание L-[14C]глутамата с изолированными нервными окончаниями головного мозга крыс (синаптосомами) в среде с низкой концентрацией Na⁺, в результате чего регистрируется повышение начальной скорости накопления L-[14C]глутамата нервными окончаниями на 10 % как у контрольных крыс, так и у тех, что подвергались гравитационной перегрузке. Эффект аналога лунного грунта является уникальным и может привести к изменению внеклеточного уровня глутамата, который крайне важен для синаптической передачи. Лунный грунт может оказывать негативное воздействие на гомеостаз глутамата в центральной нервной системе. Постоянное раздражение от контакта с частицами грунта, особенно при долгосрочных миссиях, а также сопутствующие воспаление, стресс, микрогравитация, повышенная радиация, УФ-облучение могут усилить токсическое воздействие грунта на организм человека.

Ключевые слова: аналог лунного грунта, транспорт глутамата, глутаматергическая нейротрансмиссия, нервные терминали головного мозга.

A. G. Nazarova, N. G. Pozdnyakova, O. O. Voronova, O.Yu. Chunihin, M. V. Piskova, A. O. Pastuhov, A. A. Borysov, N. V. Krisanova, T. O. Borisova

Palladin Institute of Biochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

ANALYSIS OF BIOMODULATORY PROPERTIES AND NEUROTOXICITY OF LUNAR DUST ANALOGUE

During inhalation, nano-/microsized particles of lunar dust are efficiently deposited in nasal, tracheobronchial, and alveolar regions and transported to the central nervous system. The neurotoxic potential of lunar dust has not yet been assessed. The research was focused on the analysis of the effects of lunar dust analogue on the key characteristics of glutamatergic neurotransmission. Disturbances in glutamate homeostasis contribute to the pathogenesis of major neurological disorders. The average size of particles of lunar dust analogue (JSC-1a, Lunar Soil Simulant, Orbitec, USA) before and after sonication was determined by dynamic light scattering. With the use of radiolabeled L-[¹⁴C]glutamate, it was shown that there is an increase in L-[14C]glutamate binding to isolated rat brain nerve terminals (synaptosomes) in low [Na⁺] media in the presence of lunar dust analogue that led to an apparent increase in the initial velocity of L-[14C]glutamate uptake by 10 % in control rats, and those underwent to gravitational overload. Thus, the unique effect of lunar dust analogue to increase glutamate binding to the nerve terminals was shown. This can have deleterious effects on the extracellular glutamate homeostasis in the central nervous system that is extremely important for proper synaptic transmission. During a long-term mission, a combination of constant irritation due to dust particles, inflammation, stress, low gravity and microgravity, radiation, UV, and so on may consequently change the effects of the dust and aggravate neurological consequences.

Key words: lunar soil simulant; glutamate transport; glutamatergic neurotransmission; brain nerve terminals. АПОСТОЛОВ Олександр Анатолійович — молодший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — методи обробки даних дистанційного зондування Землі з метою дослідження природних ресурсів.

БОЙКО Роман Сергійович — старший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, кандидат хімічних наук.

Напрям науки — неорганічна хімія, глибока очистка речовин від радіоактивних елементів.

БОРИСОВ Арсеній Андрійович — аспірант 2 року навчання кафедри біохімії біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка; провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія, нанонейротехнологія.

БОРИСОВА Тетяна Олександрівна — завідувач відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, професор, доктор біологічних наук.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія, ліпідологія, нанонейротехнологія.

БРИКОВ Василь Олександрович — науковий співробітник відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — клітинна біологія.

БУБНОВ Ігор Миколайович — науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ВАКОЛЮК Мар'яна Вікторівна — інженер Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — геологія.

ВІДЬМАЧЕНКО Анатолій Петрович — завідувач відділу фізики планетних систем Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — дослідження тіл Сонячної системи та екзопланет.

ВОЛКОВ Валентин Сергійович — науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрям науки — дослідження перспективних зварних конструкцій та вивчення поведінки матеріалів при зварюванні, динаміка та контроль конструкцій космічного призначення.

ВОЛЬВАЧ Ярослав Сергійович — аспірант Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ВОРОНОВА Ольга Олександрівна — інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія.

ГЛАМАЗДІН Володимир Володимирович — молодший науковий співробітник відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України.

Напрям науки — відкриті електродинамічні системи, антени.

ДАНЕВИЧ Федір Анатолійович — завідувач відділу фізики лептонів Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, лауреат премії К. Д. Синельникова НАН України.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика елементарних частинок.

ДАНИЛКІВ Ігор Семенович — старший науковий співробітник Інституту екології Карпат Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — екоморфогенез рослин.

ДЕМ'ЯНЕНКО Петро Опанасович — доцент кафедри «Радіоконструювання та виробництва радіоапаратури» Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут», кандидат технічних наук. Напрям науки — прецизійні волоконо-оптичні давачі, природа когерентності оптичного випромінювання, хвильові властивості фотонів.

ДОРОВСЬКИЙ Володимир Віталійович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ДУГІН Станіслав Сергійович — головний приладист Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — дистанційне зондування Землі та обробка даних наземної спектрометрії.

ЖОЛОБАК Галина Михайлівна — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

ЗАХАРЕНКО В'ячеслав Володимирович — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

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

Напрям науки — оцінювання та керування за умов невизначеності, динаміка структурних утворень та магнітних полів на Сонці, аналіз і прогнозування часових рядів та полів, оцінка ризиків, калібрування сенсорів та валідація даних спостережень Землі.

ЗУЄВА Олена Володимирівна — головний інженер Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України.

Напрям науки — техніка експерименту.

ЗІНЬКОВСЬКИЙ Юрій Францевич — професор кафедри «Радіоконструювання та виробництва радіоапаратури» Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут», доктор технічних наук.

Напрям науки — прецизійні оптоелектронні системи, технічний захист інформації, електродинамічні принципи спеціалізованих радіоелектронних систем.

ІВАНОВ Юрій Стратонович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — поляриметрія, космічне приладобудування.

КИРИЛЕНКО Анатолий Опанасович — завідувач відділу обчислювальної електродинаміки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — обчислювальна електродинаміка.

КИЯК Наталія Ярославівна — старший науковий співробітник Інституту екології Карпат Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — екоморфогенез рослин.

КІТ Надія Андріївна — молодший науковий співробітник Інституту екології Карпат Національної академії наук України.

Напрям науки — екоморфогенез рослин.

КОБИЧЕВА Лариса Миколаївна — провідний інженер Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України.

Напрям науки — техніка експерименту.

КОБИЧЕВ Владислав Валерійович — старший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, лауреат премії К. Д. Синельникова НАН України.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика елементарних частинок, астрофізика.

КОБИЧЕВ Роман Владиславович — технік Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, студент 5-го курсу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Напрям науки — математичне моделювання.

КОВАЛЬ Артем Олександрович — молодший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

КОЗАК Людмила Володимирівна — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

КОЗЛОВА Анна Олександрівна — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — дослідження екологічних систем із застосуванням даних дистанційного зондування Землі.

КОНОВАЛЕНКО Олександр Олександрович — заступник директора Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

КОСТИК Роман Іванович — головний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — дослідження Сонячної системи.

КРАСНОПІР Олена Вікторівна — інженер Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — геологія.

КРИСАНОВА Наталія Валеріївна — науковий співробітник відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія, нанонейротехнологія.

КРОПИВ'ЯНСЬКИЙ Борис Миколайович — науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України.

Напрям науки — ядерна фізика.

ЛОБАНОВ Леонід Михайлович — заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, академік НАН України.

Напрям науки — матеріалознавство, методи і засоби діагностики високоефективних зварних конструкцій нової техніки, дослідження та регулювання зварювальних напружень і деформацій, динаміка та контроль конструкцій космічного призначення.

ЛОБАЧЕВСЬКА Оксана Василівна — завідувач відділу екоморфогенезу рослин Інституту екології Карпат Національної академії наук України, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — бріологія, систематика і фізіологія бріофітів.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

Напрям науки — географія, енергомасообмін в геосистемах, дистанційні дослідження природних ресурсів.

МИЛОСТНА Кристина Юріївна — молодший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

МОВЧАН Дмитро Михайлович — науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геологічних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі, енергомасообмін в геосистемах, кліматичні зміни.

МОКІНА Валентина Михайлівна — молодший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України.

Напрям науки — ядерна фізика.

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

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

НАЗАРОВА Анастасія Георгіївна — провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія, нанонейротехнологія.

НАТАРОВ Михайло Петрович — молодший науковий співробітник відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України.

Напрям науки — відкриті електродинамічні системи, антени.

ПАСТУХОВ Артем Олегович — провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія, нанонейротехнологія.

ПЕРОВ Андрій Олегович — старший науковий співробітник відділу обчислювальної електродинаміки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — обчислювальна електродинаміка.

ПЄСТОВА Ірина Олександрівна — аспірантка Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — геологія.

ПІДГОРОДЕЦЬКА Людмила Володимирівна — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз, дистанційне зондування та математичне моделювання. ПІСКОВА Марина Володимирівна — студентка Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — біохімія.

ПОДА Денис Валентинович — старший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, стажування в Центрі ядерної фізики та матеріалознавства (Орсе, Франція), кандидат фізикоматематичних наук, лауреат премії Президента України для молодих вчених.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика елементарних частинок.

ПОЗДНЯКОВА Наталія Георгіївна — науковий співробітник відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія, нанонейротехнологія.

ПОЛІЩУК Оксана Григорівна — молодший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, стажування в Національному інституті ядерної фізики, відділення у Римі «Ла Сапієнца» (Рим, Італія), кандидат фізико-математичних наук, лауреат премії Президента України для молодих вчених.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика елементарних частинок.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора, завідувач відділу Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України. Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — методи і системи дистанційного зондування Землі, оброблення та аналіз багатоспектральних аерокосмічних зображень, геоінформаційні системи.

ПРОХОРЕНКОВ Андрій Сергійович — аспірант кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — процеси в навколоземному космічному просторі.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — завідувач лабораторії Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор геологічних наук.

Напрям науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач. **СЕМЕНІВ Олег Володимирович** — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз, оптимізація, дистанційне зондування, математичне моделювання, прогнозування, ідентифікація, розпізнавання образів, обробка даних, космічне приладобудування.

СЄМКО Ігор Дмитрович — інженер Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — геологія.

СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович — завідувач лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — поляриметрія, космічне приладобудування.

СКРЕСАНОВ Валерій Миколайович — старший науковий співробітник відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — відкриті електродинамічні системи та їхнє застосування у радіофізичних вимірюваннях, антени з обробкою сигналів.

СКРИПНИК Юрій Дмитрович — старший науковий співробітник відділу Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка Національної академії наук України, кандидат технічних наук, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — механіка деформівного твердого тіла.

СТАНІСЛАВСЬКИЙ Олександр Олександрович — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

СТАНКЕВИЧ Сергій Арсенійович — головний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук.

Напрям науки — фізичні засади, методи та задачі дистанційного зондування Землі, конструкція та оцінювання супутникових знімальних систем, тематична обробка космічних зображень.

СТЕШЕНКО Сергій Олександрович — старший науковий співробітник відділу обчислювальної електродинаміки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — обчислювальна електродинаміка.

СТРИЖАЛО Володимир Олександрович — завідувач відділу Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка Національної академії наук України, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, лауреат премії ім. О. М. Динника, Державної премії УРСР та Державної премії України.

Напрям науки — механіка деформівного твердого тіла.

ТИМОШЕНКО Андрій Іванович — провідний інженер Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України.

Напрям науки — техніка експерименту.

ТРЕТЯК Володимир Ілліч — провідний науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук. Лауреат премії К. Д. Синельникова НАН України, асоційований дослідник Національного інституту ядерної фізики (відділення «Ла Сапієнца», Рим, Італія), асоційований дослідник Національного інституту ядерної фізики (відділення «Ла Сапієнца», Рим, Італія),.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика елементарних частинок.

ХОДА Олег Олександрович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС).

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

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, професор, доктор фізикоматематичних наук.

Напрям науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЧЕРНЯК Дмитро Миколайович — молодший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, доктор філософії.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика елементарних частинок.

ЧУНІХІН Олександр Юрійович — старший науковий співробітник лабораторії оптичних методів дослідження Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — оптичні методи дослідження.

ШУБНИЙ Олександр Іванович — молодший науковий співробітник відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України.

Напрям науки — відкриті електродинамічні системи, антени.

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

Напрям науки — космічне приладобудування, сенсорика, дистанційне зондування.