НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ + ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ Том 21 3(94) + 2015

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

3MICT

Фізика навколоземного космічного простору

Калініченко М. М., Коноваленко О. О., Яцків Я. С., Литвиненко Л. М., Доровський В. В., Браженко А. І., Ольяк М. Р., Литвиненко О. О., Мельник В. М. Дослідження радіовипромінювання Сонця, збурень сонячного вітру та іоносфери Землі з допомогою української системи декаметрових радіотелескопів УРАН та космічних апаратів

Синявський І. І., Міліневський Г. П., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г., Данилевський В. О., Розенбуш В. К., Бовчалюк А. П., Лукенюк А. А., Шимків А. П., Міщенко М. І. Методика, апаратне забезпечення та валідація супутникових досліджень атмосферного аерозолю: перші результати підготовки до космічного експерименту АЕРОЗОЛЬ-UA

Гала І. В., Козак Л. В. Грозові розряди в атмосфері Землі

Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А. Порівняльні дослідження посухи за супутниковими та метеорологічними індексами на прикладі 2007 року в Україні

Куссуль Н. М., Шелестов А. Ю., Скакун С. В., Басараб Р. М., Яйлимов Б. Я., Лавренюк М. С., Колотій А. В., Ящук Д. Ю. Ретроспективна регіональна карта земного покриву для України: методологія побудови та аналіз результатів

Космічна біологія та медицина

Кордюм Є. Л., Недуха О. М., Грахов В. П., Мельник А. К., Воробйова Т. В., Клименко О. М., Жупанов І. В. Дослідження впливу модельованої мікрогравітації на біліпідний шар цитоплазматичної мембрани рослинних клітин

Родионова Н. В., Катькова Е. В., Нестеренко О. Н., Скрипченко Е. В. Структурно-функциональные изменения в клетках костной ткани в условиях космического полета

CONTENTS

Physics of the Near-Earth Space

- 3 Kalinichenko N. N., Konovalenko A. A., Yatskiv Ya. S., Litvinenko L. N., Dorovskii V. V., Brazhenko A. I., Olyak M. R., Litvinenko O. A., Melnik V. N. Investigations of solar radio emission, solar wind and ionospheric disturbances with using Ukrainian decameter radio telescope system URAN and spacecrafts
- 9 Syniavskyi I. I., Milinevsky G. P., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. G., Danylevsky V. O., Rosenbush V. K., Bovchaliuk A. P., Lukenyuk A. A., Shymkiv A. P., Mishchenko M. I. Methodology, hardware implementation, and validation of satellite remote sensing of atmospheric aerosols: first results of the AEROSOL-UA space experiment development
- 18 Gala I. V., Kozak L. V. Lightning in the Earth's atmosphere
- 27 *Lyalko V. I., Elistratova L. A., Apostolov A. A.* Comparative researches of a drought using satellite and meteorological indexes for 2007 within Ukraine as an example
- **31** *Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Basarab R., Yaylimov B., Lavreniuk M., Kolotii A., Yashchuk D.* Retrospective regional level land cover map for Ukraine: methodology of development and results analysis

Space Biology and Medicine

- **40** *Kordyum T. L., Nedukha O. M., Grakhov V. P., Mel'nik A. K., Vorobyova T. M., Klimenko O. M., Zhupanov I. V.* Study of the influence of simulated microgravity on the cytoplasmic membrane lipid bilayer of plant cells
- **48** *Rodionova N. V., Katkova O. V., Nesterenko O. N., Skripchenko O. V.* Structural and functional changes in the cells of the bone tissue in space flight

[©] НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ, 2015 © ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ, 2015

Заєць І., Подоліч О., Кухаренко О., Орловська І., Гайдак А., Шпильова С., Хіруненко Л., Рогутський І., Рева О., Реббоу Е., де Вера Ж.-П. П., Демец Р., Козировська Н. Передполітні тестування зразків комбучі перед експонуванням за бортом Міжнародної космічної станції

Космічне матеріалознавство

Клименко Ю. О., Мамуня Є. П., Левченко В. В., Семе-59 нів О. В., Пруцко Ю. В., Яценко В. О. Нові нанокомпозитні матеріали для електромеханічних космічних давачів

Живолуб Е. Л., Лариончик В. Н., Перепеченко Б. И., Федоров О. П. Наземная отработка космического эксперимента МОРФОС-В — экспериментальное исследование динамики поверхности раздела фаз при направленном затвердевании модельного сплава на основе сукцинонитрила

Космічне приладобудування

Иванов Ю. С., Синявский И. И., Сосонкин М. Г. Оптическая схема эшеле-спектрометра MIR для миссии ЭкзоМарс

Космічна геодинаміка та геоінформатика

Шульга О. В., Кравчук С. Г., Сибірякова Є. С., Білін-74 ський А. І., Благодир Я. Т., Вовчик Є. Б., Єпішев В. П., Кара І. В., Козирєв Є. С., Кошкін М. І., Кудак В. І., Куліченко М. О., Любич І. В., Мажаєв О. Е., Мартинюк-Лотоцький К. А., Романюк Я. О., Терпан С. С., Шакун Л. С. Розвиток Української мережі оптичних станцій УМОС як складового елементу системи контролю навколоземного космічного простору

Кривенко О. В., Лауш А. Г., Луценко В. І., Луценко І. В., Попов Д. О., Попов І. В., Соболяк О. В. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів

Наші автори

54 Zaets I., Podolich O., Kukharenko O., Orlovska I., Haidak A., Shpylova S., Khirunenko L., Rogutskyy I., Reva O., Rabbow E., de Vera J.-P. P., Demets R., Kozyrovska N. Pre-flight kombucha samples testing before exposition outboard the international space station

Space Material Science

- 59 Klymenko Yu., Mamunya Ye., Levchenko V., Semeniv O., Prutsko Yu., Yatsenko V. New nanocomposite materials for electromechanical space sensors
- **63** *Zhivolub E. L., Larionchyk V. N., Perepechenko B. I., Fedorov O. P.* Ground testing of space experiment MORFOS-V an experimental study of the interface dynamics during directional solidification of model succinonitrile-based alloy

Space Instrument Design

69 *Ivanov Yu. S., Syniavskyi I. I., Sosonkin M. G.* Optical scheme of the echelle spectrometer MIR for the ExoMars mission

Space Geodynamics and Geoinformatics

- ¹⁴ Shulga A. V., Kravchuk S. G., Sybiryakova Y. S., Bilinsky A. I., Blagodyr Ya. T., Vovchyk E. B., Epishev V. P., Kara I. V., Kozyryev Y. S., Koshkin N. I., Kudak V. I., Kulichenko N. A., Lubich I. V., Mazhaev A. E., Martynyuk-Lototsky K. P., Romanyuk Ya. O., Terpan S. S., Shakun L. S. Ukrainian network of optical stations UMOS was established in 2011 to study and control near-Earth space objects. The paper describes the structure, tools, and basic tasks of UMOS network.
- 83 Kryvenko O. V., Laush A. G., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O., Popov I. V., Sobolyak O. V. Use of satellite and tv radiation for study of atmospheric processes

91 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 05.08.15. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс. Ум. друк. арк. 10,08. Обл.-вид. арк. 10,58. Тираж 95 прим. Зам. № 4299.

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 523.164.42

М. М. Калініченко¹, О. О. Коноваленко¹, Я. С. Яцків², Л. М. Литвиненко¹, В. В. Доровський¹, А. І. Браженко³, М. Р. Ольяк¹, О. О. Литвиненко¹, В. М. Мельник¹

1 Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

² Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

³Гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики Національної академії наук України, Полтава

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ, ЗБУРЕНЬ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ІОНОСФЕРИ ЗЕМЛІ З ДОПОМОГОЮ УКРАЇНСЬКОЇ СИСТЕМИ ДЕКАМЕТРОВИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ УРАН ТА КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Досліджено властивості коронального викиду маси, який рухався у бік Землі і не був зареєстрований космічними і наземними коронографами. Доведено незамінність наземних радіоспостережень у випадках центрально-розташованих корональних викидів маси. Досліджено зв'язок між швидкістю сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот і виникненням геомагнітних збурень. Показано, що збільшення швидкості сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот, яке спостерігається радіоастрономічними методами, може свідчити про високу ймовірність виникнення геомагнітного збурення.

Ключові слова: декаметровий діапазон, сонячні радіосплески, сонячний вітер, іоносфера, мерехтіння.

вступ

Активні процеси на Сонці (корональні викиди маси (КВМ), спалахи) призводять до збурень міжпланетної плазми, магнітосфери та іоносфери Землі, порушень систем зв'язку та енергопостачання наземного та космічного базування, а в цілому — до погіршення стану космічної погоди [6]. Значний внесок у дослідження зв'язків між процесами на Сонці, в сонячному вітрі, магнітосфері та іоносфері Землі вносять космічні апарати STEREO [http://stereo.gsfc.nasa.gov/ spacecraft.shtml], SOHO [http://sohowww.nascom. nasa.gov/home.html], «Wind» [http://wind.nasa. gov/] та ін. Наземні радіотелескопи, які за деякими своїми параметрами, зокрема за чутливістю, часто переважають приймальну апаратуру космічних апаратів, дозволяють ефективно доповнювати роботу систем космічного базування шляхом надання інформації, недоступної для космічних апаратів. Наприклад, оптичні коронографи (один з основних інструментів на борту космічних апаратів) дозволяють отримувати лише проекцію швидкості КВМ на картинну площину. При цьому реальна швидкість може перевищувати виміряну коронографом у декілька разів, що може призвести до істотної помилки прогнозу часу приходу КВМ до Землі. Між тим швидкість КВМ може бути незалежно оцінена з даних спостережень радіосплесків ІІ та IV типів [3], які генеруються у процесі формування КВМ. I хоча спостереження радіосплесків також проводяться на космічних апаратах, чутливість таких вимірювань значно нижча за чутливість, яка реалізується на наземних радіотелескопах. Це пояснюється тим, що антена для прийому радіовипромінювання на борту космічного апарата зазвичай складається з одного диполя, а антена

[©] М. М. КАЛІНІЧЕНКО, О. О. КОНОВАЛЕНКО,

Я. С. ЯЦКІВ, Л. М. ЛИТВИНЕНКО, В. В. ДОРОВСЬКИЙ,

А. І. БРАЖЕНКО, М. Р. ОЛЬЯК, О. О. ЛИТВИНЕНКО,

В. М. МЕЛЬНИК, 2015



Рис. 1. Динамічний спектр сплесків II та IV типів, які спостерігалися 22 серпня 2014 р. на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2



Рис. 2. Поляризаційні профілі сплеску II типу на частоті 12 МГц (a) та сплеску IV типу на частоті 30 МГц (δ) за даними спостережень на радіотелескопі УРАН-2 (Полтава)

наземного радіотелескопа — із сотні і навіть тисячі елементів. Локальний характер вимірювань на борту космічних апаратів не гарантує також реєстрацію всіх збурень сонячного вітру, які рухаються до Землі. Особливо це стосується порівняно компактних збурень міжпланетної плазми, викликаних КВМ, які часто викликають магнітні бурі. Тим часом спостереження міжпланетних мерехтінь великої кількості космічних радіоджерел з різними координатами дозволяють надійно виявляти збурення міжпланетної плазми, визначати спектри плазмових неоднорідностей і швидкість сонячного вітру [5, 8]. Україна володіє унікальною системою декаметрових радіотелескопів УРАН яка дозволяє комплексно вивчати всі ланки сонячно-земних зв'язків: Сонце, міжпланетну плазму, іоносферу Землі.

Мета роботи — пошук зв'язків між процесами на Сонці, в сонячному вітрі та іоносфері Землі шляхом проведення радіоастрономічних спостережень на радіотелескопах системи УРАН, із залученням даних космічних апаратів.

СИНХРОННІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ КВМ, ЯКИЙ НЕ БУВ ЗАРЕЄСТРОВАНИЙ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

З травня по вересень 2014 р. провадився моніторинг спорадичного радіовипромінювання Сонця синхронно на радіотелескопах УТР-2 (Гракове) та УРАН-2 (Полтава) [1, 7]. За увесь період спостережень було зареєстровано два потужні сплески II типу: 10 червня та 22 серпня 2014 р. Для подальшого аналізу було обрано сплеск 22 серпня 2014 р. Попередній аналіз показав, що цей сплеск був ймовірно пов'язаний з КВМ, який виник над центрально-розташованою активною областю, розповсюджувався безпосередньо в напрямку Землі і не був зареєстрований космічними та наземними коронографами. Натомість КВМ 10 червня 2014 р. був виключно лімбовою подією і був добре видимий.

Корональним викидам маси 22 серпня 2014 р. передував спалах над активною областю NOAA 12146, яка розташовувалась майже на центральному меридіані Сонця. Починаючи с 10:21 UT на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2 реєструвався сплеск II типу (який зазвичай супроводжується КВМ) з потоком, який перевищував 10000 с. о. п. (рис. 1). Сплеск II типу складався з двох розділених у часі частин. Перша частина, яка тривала з 10:21 до 10:31 UT, мала характерний для цього типу сплесків частотний дрейф 33 кГц/с. Такий дрейф відповідає швидкості джерела приблизно 500 км/с. З 10:33 до 10:55 UT тривав сплеск II типу з ялинковою структурою та майже нульовим частотним дрейфом. Це означає, що перша частина сплеску генерувалася на передній ділянці фронту ударної хвилі, яка породжена СМЕ,



Рис. 3. Індекс $I_{_{\rm M}}$ іоносферних мерехтінь у серпні 2014 р. за даними спостережень на радіотелескопі УРАН-4 (Одеса)

тоді як джерело сплеску з ялинковою структурою і незначним або нульовим частотним дрейфом перебувало на бокових ділянках ударної хвилі, яка поширювалася поперек градієнту густини. З характерних властивостей даного сплеску також можна відзначити наявність випромінювання на другій гармоніці локальної плазмової частоти, що разом з потоком також є ознакою високого ступеня турбулентності в області генерації. Одночасно з початком сплеску II типу розпочався сплеск IV типу (зазвичай асоціюється з тілом КВМ) (рис. 1), який тривав більше 2.5 год і у максимумі по потоку перевищував рівень спокійного Сонця на 12 дБ. У сплеску IV типу прослідковувалися квазіперіодичні структури з періодом 40, 10 і 5 хв.

Поляризаційний профіль сплеску II типу представлено на рис. 2, *а*. Спостерігається високий ступінь поляризації (до -60 %) випромінювання на ділянках, де виявляється ялинкова структура. Ступінь поляризації випромінювання сплеску IV типу також високий, але знак поляризації зворотний (+60 %) (рис. 2, δ). Протилежний знак поляризації сплесків II типу і IV типів вказує на різний напрямок руху їхніх джерел.

Зважаючи на потужність та структуру сплеску ІІ типу, слід було очікувати помітні події в оптичному діапазоні. Тим не менш жодному з коронографів (STEREO A, Corl та Cor2, STEREO B, Corl та Cor2, SOHO-LASCO, C2 та C3) не вдалося зафіксувати жодних помітних корональних структур, які були б проявом поширення KBM. Однак через 116 год після реєстрації сплеску ІІ типу в декаметровому діапазоні довжин хвиль на Землі спостерігалася потужна геомагнітна буря $(D_{r} \approx 80 \text{ нTл})$. Час початку бурі добре узгоджується з часом приходу ймовірного КВМ. Даний факт може пояснюватись тим, що спричинений спалахом над центральною частиною сонячного диску КВМ скоріш за все поширювався безпосередньо в напрямку Землі, а тому був екранований дисками коронографів. Крім того, для супутників STEREO дана подія була залімбовою, а КВМ рухався від космічних апаратів, за Сонцем. На користь події КВМ 22 серпня 2014 р. ймовірно говорить також факт підвищення індексу іоносферних мерехтінь з 22 по 28 серпня з максимумом 25 серпня 2014 р. за даними нашого моніторингу іоносферної плазми на радіотелескопі УРАН-4 (рис. 3).

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ШВИДКІСТЮ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ГЕОМАГНІТНОЮ АКТИВНІСТЮ ПО ДАНИМ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Практично з початку спостережень сонячного вітру вивчався вплив збурень сонячного вітру на виникнення геомагнітних бур. Один з найважливіших напрямків у цих дослідженнях — зіставлення даних радіоастрономічних спостережень і геомагнітної активності. Найчастіше в цьому випадку розглядається зв'язок між зміною індексів геомагнітної активності та індексом міжпланетних мерехтінь при кутах елонгації φ, менших 90° [2]. Використання декаметрового діапазону довжин хвиль дозволяє досліджувати не тільки внутрішні, а й зовнішні області міжпланетного



Puc. 4. Часові варіації геомагнітного індексу A_p та швидкості *v* сонячного вітру *in situ* (штрихові лінії) і швидкості *v*, яка визначається зі спостережень міжпланетних мерехтінь (радіотелескопи УТР-2 та УРАН-2) низькоширотного радіоджерела 3С144 (кружки) і більш високоширотних радіоджерел 3С196 і 3С254 (відповідно трикутники і квадратики)

середовища при кутах елонгації $\phi \ge 90^{\circ}$, де протяжність розсіювального шару може становити кілька астрономічних одиниць і охоплювати області швидкого і повільного сонячного вітру.

Метою даного дослідження було вивчення особливостей високошвидкісних потоків сонячного вітру і їхнього впливу на виникнення помірних геомагнітних збурень при середньодобових значеннях геомагнітних індексів $A_n \leq 50$ — 60. В роботі аналізувалась швидкість сонячного вітру, визначена із спостережень міжпланетних мерехтінь на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2 при кутах елонгації $\phi \ge 90^\circ$, спільно з *in situ* параметрами сонячного вітру на рівні орбіти Землі і геомагнітними індексами А_n. Спостереження на УТР-2 і УРАН-2 проводилися в 2003 — 2011 pp. на робочій частоті $f_0 = 25$ МГц. Для дослідження були відібрані інтервали тривалістю не менше 4 днів, коли спостереження проводилися на декількох геліоширотах і було зафіксовано збільшення швидкості сонячного вітру до значень $v \ge 500 \text{ км/c}.$

Перша група даних включає часові інтервали поблизу максимуму сонячної активності, а саме у березні і квітні 2003 р., а також у лютому 2011 р. На рис. 4, *а* наведено графіки швидкості *v* сонячного вітру *in situ* [Database of CELIAS/MTOF proton monitor on the SOHO spacecraft. — http:// umtof.umd.edu/pm/crn/] і швидкості, визначеної із спостережень міжпланетних мерехтінь радіоджерел 3C144 (геліоширота $\beta = -1.3^\circ$) і 3C196 ($\beta = 27.57^\circ$). Ми бачимо помітне збільшення швидкості сонячного вітру на різних геліоширотах. Значення швидкості сонячного вітру, отриманої зі спостережень мерехтінь 3C 144 і 3C196, відповідають даним швидкості *in situ* із запізненням відповідно 2 і 1 дні.

Порівняння з даними архіву IAS-MEDOC [http://idc-medoc.ias.u-psud.fr/] засвідчило, що збільшення швидкості сонячного вітру поблизу Землі приблизно 14—15 лютого було викликане високошвидкісним потоком з корональної діри. Різке зростання швидкості, що спостерігалося поблизу Землі приблизно 18 лютого, може бути пов'язане зі спалахом Х2-класу і викидом корональної маси. На рис. 4, б наведено графіки геомагнітних індексів A_n [Database of World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Moscow. http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagni.ind/]. Можна відзначити помітне збільшення значень А, 14 і 18 лютого, що свідчить про виникнення геомагнітних збурень. Збільшення швидкості сонячного вітру у березні 2003 р. і у квітні 2003 р. також може бути пов'язане переважно з високошвидкісними потоками з корональних дір (див. дані IAS-MEDOC). У той же час різке зростання швидкості, що спостерігалося поблизу Землі приблизно 20 березня може бути пов'язане зі спалахом класу Х1, що мав місце 17 березня. Згідно з даними моніторингів у березні та квітні 2003 р. мало місце помітне збільшення значень A_{n} ($h \ge 50$). Радіоастрономічні спостереження на радіотелескопі УТР-2 у ці періоди часу також показали збільшення швидкості сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот.

У другу групу увійшли дані, які відповідають мінімуму сонячної активності в листопаді 2007 р. та грудні 2008 р. На рис. 4, в приведені графіки швидкості сонячного вітру in situ і швидкості, визначеної із спостережень міжпланетних мерехтінь радіоджерел 3С144 (геліоширота $\beta = -1.3^{\circ}$), 3С196 ($\beta = 27.57^{\circ}$) і 3С254 ($\beta = 32.54^{\circ}$) у грудні 2008 р. Ми бачимо, що збільшення швидкості спостерігалося виключно поблизу площини екліптики. Згідно з даними архіву IAS-MEDOC підвищення швидкості пов'язане із проходженням поблизу Землі високошвидкісного потоку від корональної діри. Крім того, спостереження мерехтінь 3С144 показало запізнення збільшення швидкості порівняно із швидкістю in situ на два дні. Також можна відзначити досить низькі значення геомагнітного індексу А, (рис. 1, г). Аналогічні результати отримано для листопада 2007 p.

Необхідною умовою для виникнення геомагнітного збурення є наявність негативного (південного) компонента міжпланетного магнітного поля $B_z < -5$ нТл [4]. Автори виділяють два види сонячно-земних подій, які призводять до геомагнітних збурень. Перший — це корональний викид маси, який породжує магнітну хмару і область стиснення перед нею з південним компонентом магнітного поля. Другий — корональна діра, яка є джерелом швидкого сонячного вітру, на кордоні якого формується область стиснення із $B_z < 0$. У березні 2003 р. у період спостережень на УТР-2 згідно з даними Database of ACE Science Center from ACE spacecraft [http://www.srl.caltech. edu/ACE/ASC/level2/] мали місце помітні коливання перпендикулярного до площини екліптики B_{z} -компонента міжпланетного магнітного поля з мінімальним значенням $B_z \approx -7.1$ нТл 20 березня при середньодобовому значенні $\overline{B}_{z} \approx$ ≈ -0.85 нТл. Мінімальне значення південного компоненти міжпланетного магнітного поля у квітні 2003 р. становило $B_{z} \approx -6$ нТл (25 квітня) при середньодобовому значенні $\overline{B}_{z} \approx -1.7$ нТл. У лютому 2011 р. мінімальне значення склало $B_{z} \approx$ ≈ -8.8 нТл 18 лютого і $B_{_7}$ ≈ -5.3 нТл 19 лютого при середньодобових значеннях відповідно $\overline{B}_{z} \approx$ ≈ 4 нТл і \overline{B}_{z} ≈ -1.8 нТл. У листопаді 2007 р. і грудні 2008 р. мали місце переважно незначні коливання $B_{_7}$ -компонента міжпланетного магнітного поля, мінімальне значення якого склало $B_z \approx$ ≈ -6 нТл 16 листопада 2007 р. і $B_{_7}$ ≈ -6.5 нТл 22 грудня 2008 р. при середньодобових значеннях відповідно $\overline{B}_{z} \approx 0.33$ нТл і $\overline{B}_{z} \approx 1.1$ нТл. Порівняння зі значеннями геомагнітного індексу А дозволяє стверджувати, що геомагнітні збурення виникали при негативних середньодобових значеннях В₂-компонента міжпланетного магнітного поля. Разом з тим від'ємні миттєві значення B_{z} -компонента магнітного поля не завжди викликали збільшення індексу А.

висновки

Проведені дослідження доводять незамінність наземних радіоспостережень у випадках центрально-розташованих КВМ, які рухаються в напрямку Землі і можуть не реєструватися космічними і наземними коронографами. Збільшення швидкості сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот, яке спостерігається радіоастрономічними методами, може свідчити про високу ймовірність виникнення геомагнітного збурення, пов'язаного із проходженням даного високошвидкісного потоку. Радіоастрономічні спостереження в широкому діапазоні геліоширот поряд із спостереженнями *in situ* можуть бути використані для розробки методики прогнозування геомагнітних збурень.

Робота виконана при фінансовій підтримці «Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 — 2016 рр.» в рамках проекту «Одночасні дослідження радіовипромінювання Сонця, збурень сонячного вітру та іоносфери Землі з допомогою української системи декаметрових радіотелескопів УРАН та космічних апаратів».

- 1. *Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г.* Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. М.: Связь, 1978. № 26. С. 3—15.
- 2. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Связь между вариациями индекса геомагнитной активности и параметров межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и аэрономия. — 1985. — 25, № 2. — С. 254—258.
- 3. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А. и др. Свойства сложного всплеска II типа с богатой «ёлочной» структурой на частотах 3 — 33 МГц // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, № 2. — С. 107—117.
- 4. *Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофиз. процессы и биосфера. — 2009. — **8**, № 1. — С. 5—35.
- 5. Калиниченко Н. Н., Фалькович И. С., Коноваленко Н. Н. и др. Корональный выброс массы 15 февраля 2011 года в межпланетном пространстве и его наблюдения методом мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, № 4. — С. 301—308.
- Кременецький І. О., Черемних О. К. Космічна погода. Київ: Наук. думка, 2009. — 143 с.
- 7. *Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В. и др.* Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 4. — С. 345—356.
- Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н. и др. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003— 2004 гг. // Радиофизика и радиоастрономия. — 2006. — 11, № 1. — С. 31—41.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

- Н. Н. Калиниченко¹, А. А. Коноваленко¹, Я. С. Яцкив²,
- Л. Н. Литвиненко¹, В. В. Доровский¹, А. И. Браженко³, М. Р. Ольяк¹, О. А. Литвиненко¹, В. Н. Мельник¹
- ¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков
- ² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев
- ³ Гравиметрическая обсерватория Института геофизики Национальной академии наук Украины, Полтава

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА, ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, С ПОМОЩЬЮ УКРАИНСКОЙ СИСТЕМЫ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ УРАН И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Исследованы свойства коронального выброса массы, который двигался в сторону Земли и не был зарегистрирован космическими и наземными коронографами. Доказана незаменимость наземных радионаблюдений в случае центрально-расположенных КВМ. Исследована связь между скоростью солнечного ветра в широком диапазоне гелиоширот и возникновением геомагнитных возмущений. Показано, что увеличение скорости солнечного ветра в широком диапазоне гелиоширот, которое наблюдается радиоастрономическими методами, может свидетельствовать о высокой вероятности возникновения геомагнитного возмущения.

Ключевые слова: декаметровый диапазон, солнечные радиовсплески, солнечный ветер, ионосфера, мерцания

N. N. Kalinichenko¹, A. A. Konovalenko¹, Ya. S. Yatskiv², L. N. Litvinenko¹, V. V. Dorovskii¹, A. I. Brazhenko³, M. R. Olyak¹, O. A. Litvinenko¹, V. N. Melnik¹

- ¹ Radio Astronomy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
- ² Main Astronomy Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
- ³ Gravimetric Observatory of Geophysic Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava

INVESTIGATIONS OF SOLAR RADIO EMISSION, SOLAR WIND AND IONOSPHERIC DISTURBANCES WITH USING UKRAINIAN DECAMETER RADIO TELESCOPE SYSTEM URAN AND SPACECRAFTS

Properties of the coronal mass ejection, which moved toward Earth and was not registered by cosmic and ground based coronagraphs, were studied. It was proved irreplaceableness of ground-based radio observations in the case of central placed CME. The connection between the solar wind in the wide band of heliolatitudes and appearance of geomagnetic storms was investigated. It was shown that the increase of the solar wind velocity in the wide-band of heliolatitudes, which is observed by radio astronomy methods, proves the high possibility of geomagnetic storm appearance in this case.

Key words: decameter range, solar radio bursts, solar wind, ionosphere, scintillations.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

УДК 551.510.42

I. I. Синявський¹, Г. П. Міліневський^{1,2}, Ю. С. Іванов¹, М. Г. Сосонкін¹, В. О. Данилевський², В. К. Розенбуш¹, А. П. Бовчалюк¹, А. А. Лукенюк³, А. П. Шимків³, М. І. Міщенко⁴

1 Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

³Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Львів

⁴Годдардівський інститут космічних досліджень НАСА, Нью-Йорк, США

МЕТОДИКА, АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ: ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ПІДГОТОВКИ ДО КОСМІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ «АЕРОЗОЛЬ-UA»

Проведено підготовку до створення комплексу наукової апаратури експерименту «Аерозоль-UA», зокрема поляриметра «СканПол», для вивчення з борту космічного апарата глобального розподілу фізичних властивостей аерозольних частинок та хмарних утворень в атмосфері Землі за вимірюваннями поляризаційних та спектральних характеристик розсіяного сонячного випромінювання. Виконано розробку вузлів макета поляриметра «СканПол», вузлів оптико-механічного блоку та блоку управління сканувальних дзеркал, а також електронних вузлів. Розроблено концепцію алгоритму визначення параметрів аерозолю над водною поверхнею, поверхнею Землі та хмарами. Продовжено доопрацювання методики роботи мобільної станції валідації та калібрування поляриметричних вимірювань аерозолю для підтримки космічного експерименту.

Ключові слова: космічний експеримент, дослідження аерозолів, поляриметр.

ВСТУП

Відомо, що аерозолі в атмосфері Землі суттєво впливають на клімат планети, однак інформації для кількісних оцінок цього впливу, зокрема від аерозолю антропогенної природи, недостатньо, особливо інформації про природу та фізичні властивості частинок. Космічний експеримент «Аерозоль-UA» має на меті створення бази даних, яка ґрунтується на безперервному вимірюванні з супутника оптичних характеристик аерозольних і хмарних частинок в атмосфері Землі протягом досить тривалого часу. База даних необхідна для визначення часового та просторового розподілу кількості, фізичних характеристик та хімічного складу тропосферного і стратосферного аерозолю і хмарних частинок у земній атмосфері та оцінки їхнього впливу на погоду, клімат і ступінь забруднення навколишнього середовища [1].

Нижче описано результати виконання розділу проекту «Аерозоль-UA» з розробки сканувального поляриметра «СканПол», алгоритму опрацювання даних та методики наземної підтримки космічної місії. Ці роботи є продовженням підготовки космічної місії «Аерозоль-UA», розпочатої у 2013 р. за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

РОЗРОБКА ОПТИКО-МЕХАНІЧНОГО БЛОКУ ПОЛЯРИМЕТРА «СКАНПОЛ»

Оптична схема приладу. Сканувальний поляриметр «СканПол» місії «Аерозоль-UA» базується

[©] І. І. СИНЯВСЬКИЙ, Г. П. МІЛІНЕВСЬКИЙ, Ю. С. ІВАНОВ, М. Г. СОСОНКІН, В. О. ДАНИЛЕВСЬКИЙ, В. К. РОЗЕНБУШ, А. П. БОВЧАЛЮК, А. А. ЛУКЕНЮК, А. П. ШИМКІВ, М. І. МІЩЕНКО, 2015



Рис. 1. Оптична схема поляриметра «СканПол»: 1—4 — сканувальна дзеркальна система, 5 — вхідний об'єктив оптичного блоку VIS, 6 — вхідний об'єктив оптичного блоку IR, 7 — коліматор, 8 — призма Волластона, 9—14 — дихроїчні дзеркала відповідних спектральних діапазонів, 15—20 — система камерних об'єктивів та інтерференційних фільтрів для відповідних спектральних каналів, 21 — приймач випромінювання для видимого спектрального діапазону, 22 — приймач випромінювання для видимого спектрального діапазону, 22 — приймач випромінювання для ІЧ-діапазону

на концепції космічної місії НАСА «Глорі», метою якої був моніторинг просторового і часового розподілу основних характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів у атмосфері Землі за допомогою поляриметра APS [15]. Експеримент «Глорі» не був виконаний у зв'язку з технічними проблемами ракети-носія під час запуску.

У поляриметрі «СканПол» кількість спектральних каналів зменшено до шести у порівнянні з поляриметром APS, але введено новий спектральний канал на $\lambda = 370$ нм. Орбітальний сканувальний поляриметр «СканПол» призначений для вимірювання з високою точністю параметрів Стокса *I*, *Q*, *U* у спектральних каналах від ближньої ультрафіолетової до короткохвильової інфрачервоної області в широкому діапазоні фазових кутів з фотометричною точністю 4 % та поляриметричною точністю 0.2 %. Поляриметр «СканПол» складається з сканувальної дводзеркальної системи, призначеної для передачі сонячного випромінювання, розсіяного досліджуваними ділянками системи атмосфера поверхня, на вхідні зіниці всіх оптичних блоків одночасно. Сканувальна система має пару дзеркал, що утворюють поляризаційно нейтральну комбінацію, яка робить близько 60 обертів за хвилину у площині орбіти космічного апарата. Кутовий діапазон сканування поверхні Землі складає $\pm 60^{\circ}$ від напрямку в надир. Поляриметр містить чотири оптичних блоки, два з яких забезпечують роботу УФ-каналу та каналів у видимому діапазоні спектру (VIS-1, VIS-2) з робочим спектральним діапазоном $\lambda = 370...555$ нм, а два (IR-1, IR-2) — у близькій ІЧ-ділянці спектру з робочим спектральним діапазоном $\lambda =$ = 865...1610 нм (див. рис. 1). Спектральні канали поляриметра блоків VIS використовуються для оцінки поглинальної здатності тропосферного аерозолю та його вертикального розподілу (максимум пропускання $\lambda = 370$ нм, півширина діапазону пропускання $\Delta \lambda = 10$ нм), зондування аерозолю над океаном та суходолом ($\lambda = 410$ нм, $\Delta \lambda = 20$ нм), для визначення кольору океану та зондування аерозолю ($\lambda = 555$ нм, $\Delta \lambda = 20$ нм). Оптичні блоки IR містять спектральні канали, необхідні для зондування аерозолю над океаном та сушею ($\lambda = 865$ нм, $\Delta \lambda = 40$ нм), для відокремлення сигналу хмар цирусів і стратосферних аерозолів і відокремлення тропосферних та стратосферних аерозолів в разі потужних вивержень вулканів ($\lambda = 1378$ нм, $\Delta \lambda = 40$ нм), а також канал для оцінки внеску поверхні у вимірюваний сигнал над сушею ($\lambda = 1610$ нм, $\Delta \lambda = 40$ нм).

Оптичну схему приладу показано на рис. 1. Кожен з оптичних блоків складається з наступних елементів (послідовно, по ходу променя від сканувальної системи): вхідного об'єктива, що формує проміжне зображення досліджуваного об'єкта; польової діафрагми (на рис. 1 не показано); коліматора; призм Волластона, які розщеплюють випромінювання на компоненти S і P з ортогональною поляризацією і, таким чином, відіграють роль аналізатора; системи дихроїчних дзеркал та інтерференційних фільтрів, що виділяють необхідний вузький спектральний діапазон $\Delta\lambda$; камерних об'єктивів, які формують по два зображення (S і P) на приймачах випромінювання.

Конструкція оптико-механічного блоку. Проведено детальний аналіз та комп'ютерне моделювання оптико-механічного блоку приладу «СканПол». На рис. 2 показано його конструкцію, яка задовольняє відповідним вимогам компактності та жорсткості. Але головною вимогою є досягнення збігу полів зору кожного з чотирьох оптичних блоків. Для цього було запропоновано монолітний корпус з концентричними отворами, в які монтуються чотири вузли вхідних об'єктивів та коліматори. На рисунку основні елементи рознесені в просторі.



Рис. 2. Загальний вигляд оптико-механічного блоку: 1 -корпус, 2 -вузол вхідного об'єктива та коліматора оптичного блоку VIS, 3 -вузол вхідного об'єктива та коліматора IR, 4 -вузол призми Волластона, 5 -вузол спектральної селекції та камерних об'єктивів VIS, 6 вузол спектральної селекції та камерних об'єктивів IR, 7 -фланець, 8 - 9 -бокові пластини



Рис. 3. Ескіз вузла вхідного об'єктива та коліматора оптичного блоку VIS: 1— вхідний об'єктив, 2— коліматор, 3— корпус, 4, 8— елементи фіксації, 5— діафрагма, 6, 7— проміжні кільця

Основною функцією вузла вхідного об'єктива та коліматора (рис. 3) є виділення необхідного миттєвого поля зору, для чого використовується польова діафрагма, встановлена у фокальній площині вхідного об'єктива, та колімація випромінювання, що далі потрапляє на призму Волластона. Конструкція вказаного вузла розроблена таким чином, що дозволяє складати та юстувати кожен вузол окремо з чіткою фіксацією необхідного кутового поля зору системи.



Рис. 4. Ескіз та модель у перерізі вузла спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичного блоку VIS: *1* — камерний об'єктив каналу 370 нм, *2* — камерний об'єктив каналу 410 нм, *3* — камерний об'єктив каналу 555 нм, *4* — модуль канальних перетворювачів світла зчитувача оптичної інформації, *5* — корпус, *6*—*8* — дихроїчні дзеркала

Вузли призм Волластона кожного оптичного блоку також розміщуються в корпусі (див. 4 на рис. 2) і можуть точно позиціонуватися по куту повороту навколо своєї осі при складанні та юстуванні оптико-механічного блоку.

Розроблено вихідні технічні вимоги до елементів спектральної селекції, а саме до дихроїчних дзеркал та інтерференційних світлофільтрів. Вузли спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичних блоків VIS та IR призначені для виділення необхідних вузьких спектральних каналів з напівширинами Δλ. На рис. 4 показано ескіз вузла спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичного блоку VIS. Вузол конструктивно представляє корпус, в якому закріплені дихроїчні дзеркала та до якого також кріпляться камерні об'єктиви. При складанні оптико-механічного блоку конструкція стягується боковими пластинами (рис. 2), що відіграють роль ребер жорсткості. Для макетного зразка оптико-механічного блоку бортового поляриметра «СканПол» підготовлено конструкторську документацію. Виготовлено основні вузли блоку, які будуть використані для натурних випробувань.

Попереднє дослідження блоку сканувальних дзеркал показало, що запропонована комбінація дзеркал дійсно компенсує поляризацію при відбитті від металевого покриття. Залишкова величина поляризації залежить від довжини хвилі (у «синій» ділянці спектру збільшена на 0.6 %) та від кута поля зору (до 0.2 %). Ця величина може бути врахована калібруванням приладу.

Багатоканальний зчитувач оптичної інформаиї. Приймачі світла «СканПол» розташовані на модулях канальних перетворювачів світла зчитувача оптичної інформації (рис. 4). Макет багатоканального зчитувача оптичної інформації, який був розроблений та виготовлений, має забезпечувати перетворення потоку світла у визначених вище спектральних діапазонах в електричний сигнал з використанням фотодіодів та оцифрування даних вимірювань світлових потоків. Також було розроблено та виготовлено модулі канальних перетворювачів світла. Для перетворення аналогового сигналу з фотодіодів у цифрову форму було використано модуль E14-440 AD/ DA Converter. Для перевірки функціонування багатоканального зчитувача оптичної інформації було розроблено та відпрацьовано відповідне програмне забезпечення. Розробка плат модулів пар фотоприймачів була виконана за умови забезпечення мінімальних розмірів та високої точності позиціонування фотодіодів.

КОНЦЕПЦІЯ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОЛЯРИМЕТРА «СКАНПОЛ»

Дані поляриметра «СканПол» складаються з результатів вимірювань потоку світла у спектральних каналах та з телеметричних даних. Визначення характеристик аерозольних та хмарних частинок шляхом розв'язку оберненої задачі за даними супутникового інструмента «СканПол» проекту «Аерозоль-UA» полягає в обробці результатів дистанційних кутових, мультиспектральних і поляризаційних вимірювань. Виміряна величина інтенсивності випромінювання повинна бути виправлена з врахуванням поглинання атмосферними газами з використанням супутникових даних OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite), OMI (Ozone Monitoring Instrument) та інших.

Алгоритм визначення характеристик аерозольних частинок застосовується для ділянок із хмарами та тонких перистих хмар по-різному. Алгоритм використовує статистичну оптимізацію для порівняння між промодельованим полем випромінювання і спостережними даними з урахуванням похибок обох полів. Процес пошуку найбільш точного збігу виконується шляхом ітерацій, допоки похибки не стануть малими, що свідчить про визначення з високою точністю. Ефективне використання такого підходу вимагає надлишковості даних, яке буде забезпечене вимірюваннями поляриметра «СканПол» параметрів Стокса I, Q і U з більш ніж 200 кутів розсіяння для кожного пікселя на поверхні та у шести спектральних каналах (λλ 370, 410, 555, 865, 1378, 1610 нм). Не всі вимірювання є незалежними, оскільки канал 1378 нм служить для оцінки внеску тонких перистих хмар та/або стратосферного аерозолю.

При здійсненні більш ніж 3600 (3×200×6) вимірювань для кожної ділянки спостереження «СканПол» вони можуть бути використані для визначення оптичної товщини, розміру, комплексного показника заломлення і альбедо одноразового розсіяння (SSA) для бімодального розподілу за розмірами аерозолів над океаном і сушею, а також над хмарами. Алгоритм обробки даних супутникового поляриметра «СканПол» є подібним до алгоритму прототипу інструмента APS, що був використаний для вимірювань з літака [18]. *Моделювання вимірювань*. Інтенсивність та поляризація сонячного випромінювання описується вектором Стокса, який складається з чотирьох параметрів *I*, *Q*, *U* та *V* [9]:

$$\mathbf{I} = (I, Q, U, V)^{\mathrm{T}}, \tag{1}$$

де *I* описує інтенсивність поля випромінювання, *Q* та *U*— величину та напрям лінійної поляризації, а *V*— величину кругової поляризації.

Вектор інтенсивності сонячного променя, що проходить через плоскопаралельну атмосферу у напрямку (θ_s , φ_s), позначимо \mathbf{I}_0 , де θ_s та φ_s — сонячний зенітний та азимутальний кути відповідно. Враховуючи відбивні властивості поверхні Землі, вихідний вектор Стокса \mathbf{I}_u на верхній границі атмосфери у напрямку (θ_v , φ_v) запишемо таким чином:

$$\pi \mathbf{I}_{u}(\lambda,\mu_{s},\mu_{v},\boldsymbol{\varphi}_{s}-\boldsymbol{\varphi}_{v}) =$$
$$=\mu_{s}\mathbf{R}^{Atm+Surf}(\lambda,\mu_{s},\mu_{v},\boldsymbol{\varphi}_{s}-\boldsymbol{\varphi}_{v})\mathbf{I}_{0}(\lambda,\mu_{s},\boldsymbol{\varphi}_{s}), \quad (2)$$

де λ вказує на спектральну залежність величини, μ_s та μ_v — косинуси сонячного та спостережного зенітного кутів відповідно. **R**^{*Almn+Surf*} — це матриця відбиття (4×4) системи поверхня — атмосфера [9], яка описує усі процеси розсіяння, що виникають у цій системі. Ці матриці можуть бути обчислені для будь-якої заданої моделі атмосфери та поверхні з використанням методу додавання [6]. Подібні матриці можуть бути обчислені для висхідного та низхідного випромінювання на будь-якому рівні атмосфери, що дозволяє моделювати поляризоване поле випромінювання для порівняння з виміряним полем поляриметром «СканПол».

Для того щоб обчислити властивості багаторазового розсіяння в атмосфері, використовуючи метод додавання, потрібно задати вертикальний розподіл розсіювальних частинок та їхні властивості. Ми використовуємо молекулярну оптичну товщину, наведену у роботі [9] з шкалою висот 8 км, разом зі спектрально інваріантною деполяризацією 0.028 [2] для визначення властивостей та вертикального розподілу релеївського розсіювання. Припускаємо, що розподіл аерозолю за розмірами бімодальний, кожна з мод (дрібнодисперсна та крупнодисперсна) описується власним логнормальним розподілом за розмірами:

$$N(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma}r} \exp\left[\frac{-(\ln r - \ln r_g)^2}{2\sigma^2}\right],$$
 (3)

де r_g — середній геометричний радіус (мкм), σ^2 — дисперсія, а N_0 (мкм⁻²) — загальна кількість частинок на одиницю площі вздовж напрямку спостереження. Частинки аерозолю в алгоритмі над сушею вважаються сферичними, тому для визначення їхніх оптичних властивостей потрібно визначити комплексний показник заломлення $m_r - im_i$ для кожної моди. Оптичну товщину аерозолю т та альбедо одноразового розсіювання ω_0 можна визначити через поперечні перерізи екстинкції (C_{ext} , мкм²) та розсіяння (C_{sca} , мкм²):

$$\tau = N_0 C_{ext},\tag{4}$$

$$\omega_0 = C_{sca} / C_{ext}.$$
 (5)

Для природного світла колова поляризація, як правило, на кілька порядків менша за лінійну поляризацію, тому нею нехтують та використовують наближення 3×3 для повної матриці відбиття 4×4 . Загальний коефіцієнт відбиття виражається через позаатмосферну спектральну густину енергетичної світності I_0 (Вт/м²нм⁻¹):

$$R = \pi I / (\mu_s I_0). \tag{6}$$

Коефіцієнт відбиття поляризованого сонячного випромінювання дорівнює

$$R_p = \pi Q / (\mu_s I_0), \tag{7}$$

де Q — другий параметр Стокса, визначений відносно площини розсіяння. Параметр Q тут достатній для опису лінійної поляризації, оскільки величина U стає незначною, коли параметри Стокса визначаються відносно плошини розсіяння і коли коефіцієнт відбиття поляризованого випромінювання від поверхні є аналогічним до коефіцієнта відбиття Френеля [4]. Знак коефіцієнта відбиття поляризованого випромінювання буде додатним (від'ємним), коли напрям поляризації перпендикулярний (паралельний) до нормалі до площини розсіяння. Коефіцієнт відбиття поляризованого випромінювання визначається законом Френеля (тобто, показником заломлення поверхні та кутом відбиття), фізичними властивостями поверхні (шорсткістю, нахилом листя тощо), напрямками та місцем спостереження.

Алгоритм. Відтворення характеристик частинок полягає у визначенні найбільш вірогідного стану атмосфери у залежності від виміряних величин та деякого апріорного значення цього середовища [17]. Визначення найбільш вірогідного стану атмосфери ідентичне до мінімізації функції втрат Ф:

$$\Phi = (\mathbf{Y} - \mathbf{F})^{\mathrm{T}} \mathbf{C}_{T}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{F}) + (\mathbf{X} - \mathbf{X}_{a})^{\mathrm{T}} \mathbf{C}_{a}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_{a}), \quad (8)$$

де **Y** — виміряний вектор, **F** — модельний вектор, \mathbf{C}_T^{-1} — загальна коваріаційна матриця похибок, **X** — вектор стану атмосфери, \mathbf{X}_a — вектор апріорного стану атмосфери, \mathbf{C}_a^{-1} — апріорна коваріаційна матриця похибок.

Перший доданок у рівнянні (8) відповідає зваженим похибкам методу найменших квадратів і показує відстань між виміряним та змодельованим коефіцієнтом відбиття поляризованого випромінювання. Загальна коваріаційна матриця похибок обраховується для похибок вимірювання та деяких потенційних похибок моделювання.

Другий доданок у рівнянні (8) є «штрафною» функцією, що обмежує розв'язок бути близьким до апріорного стану та визначається кількісно апріорною коваріаційною матрицею похибок. Вектор стану **X** містить параметри аерозолю, що дозволяють характеризувати кожну моду окремо (f — дрібнодисперсна, c — крупнодисперсна): N^f , r_g^f , σ^f , m_r^f , N^c , r_g^c , σ^c , m_r^c , m_i^c та тиск P, що відповідає висоті, де лежить верхня границя аерозольного шару. Апріорне значення параметрів аерозолю ґрунтується на даних, приведених у роботі [7]. Апріорні значення N^f та N^c отримуються з використанням підходу Look-Up-Table (LUT).

Визначення найкращого розв'язку **X**, що мінімізує функцію втрат, потребує розв'язання нелінійного рівняння. Нелінійні системи зазвичай розв'язуються за допомогою процедури ітерацій Гаусса — Ньютона, проте на практиці застосовується метод Левенберга — Марквардта [17], який реалізується за допомогою рівняння

$$\mathbf{X}^{i+1} = \mathbf{X}^{i} - [\mathbf{H}(\mathbf{X}^{i}) + \gamma \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \nabla_{\mathbf{X}} \Phi(\mathbf{X}^{i}), \qquad (9)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}^{i}) = \nabla_{x}^{2} \Phi(\mathbf{X}^{i}) \approx \mathbf{C}_{a}^{-1} + \mathbf{K}_{i}^{T} \cdot \mathbf{C}_{T}^{-1} \mathbf{K}_{i}, \ \mathbf{K}_{i} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}_{i}}. (10)$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

де I — одинична матриця з розмірністю вектора стану, *і* вказує на число ітерацій, а γ — додатний коефіцієнт, що спричинює збіжність ітерацій, H — матриця Гессе, K — матриця Якобі, яка виражає чутливість прямої моделі до відтвореної величини (тобто, чутливість коефіцієнта відбиття поляризованого випромінювання до параметрів аерозолю).

Критерії зміни величини γ залежать від поведінки збіжності. Якщо $\Phi(\mathbf{X}^{i+1}) > \Phi(\mathbf{X}^i)$, то відкидається розв'язок і збільшується значення γ , поки $\Phi(\mathbf{X}^{i+1}) < \Phi(\mathbf{X}^i)$, тоді приймається розв'язок \mathbf{X}^{i+1} , і зменшується γ . Для більших значень γ стрімкий спуск переважає, і збіжність повільна (тобто, малий розмір кроку), але надійна, тоді як при менших значеннях пошук перетворюється на швидкий ньютонівський спуск. Процес ітерацій зупиняється тоді, коли не відбувається зміни функції втрат між двома виконаними ітераційними кроками.

Метод оптимальної оцінки також забезпечує похибки відтворених параметрів. Матриця Гессе, отримана на останньому кроці ітерацій, може бути використана для обчислення коваріаційної матриці похибок **С**, при відтворенні параметрів:

$$\mathbf{C}_{x} = (\mathbf{C}_{a}^{-1} + \mathbf{K}_{i}^{T} \cdot \mathbf{C}_{T}^{-1} \mathbf{K}_{i})^{-1}.$$
(11)

Квадратні корені діагональних елементів дозволяють отримати стандартне відхилення, пов'язане з кожним відтвореним параметром. Мікрофізичні параметри аерозолю, що містяться у векторі X коваріаційної матриці похибок C_x , при відтворенні параметрів можуть бути використані для обчислення стандартного відхилення, пов'язаного з будь-яким іншим параметром аерозолю, що залежить від елементів X. Для оптичної товщини аерозолю стандартне відхилення дорівнює

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} C_{x,i,j} \frac{\partial \tau}{\partial X_{i}} \frac{\partial \tau}{\partial X_{j}}}.$$
 (12)

Подібна формула застосовується і для альбедо одноразового розсіяння.

Перше припущення для параметрів аерозолю (X^0) необхідне для початку ітераційного процесу, а «хороше» припущення дозволяє скоротити кількість ітерацій та полегшує завдання

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

знаходження розв'язку X, що є локальним мінімумом функції втрат Ф. Ми використовуємо підхід LUT, щоб отримати першу оцінку оптичної товщини та модель аерозолю. Коефіцієнти відбиття поляризованого випромінювання розраховуються для різних оптичних товщин аерозолю, напрямків спостереження та аерозольних моделей.

НАЗЕМНА ПІДТРИМКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Наземна підтримка вимірювань аерозолю у проекті «Аерозоль-UА» базується на методиці, обладнанні та досвіді міжнародної мережі AERONET [10]. Контроль достовірності даних поляриметра «СканПол» буде виконуватись шляхом порівняння інтегральної по висоті спектральної оптичної товщини аерозольного шару, а також усереднених по висоті усього атмосферного стовпа параметрів аерозольних частинок, визначених з одночасних вимірювань оптичних характеристик однієї й тієї ж повітряної маси, виконаних приладом «СканПол» та засобами AERONET. Зокрема, два фотометри CIMEL CE318 цієї мережі вже встановлено в Україні, і опрацювання наземних даних спостережень аерозолю на українських станціях AERONET, виконане нещодавно, дозволило визначити сезонні характеристики аерозолю в атмосфері над Україною [13]. Один з цих фотометрів планується використовувати як мобільну станцію AERONET, яка буде розташовуватися у місцевостях, через які пролягатиме наперед обчислена траса підсупутникової точки «Аерозоль-UA». Критерії «одночасності» наземних та супутникових вимірювань вже визначені у численних роботах [5, 8, 11, 12, 16]. Використання мобільної станції AERONET дозволить оперативно виконувати такі одночасні спостереження саме у підсупутниковій області траєкторії апарата «Аерозоль-UA», що надасть можливість покращити точність даних, отриманих з супутника. Набутий раніше [3, 14] досвід роботи з мобільною станцією в різних районах України дозволяє відпрацювати експериментально методику наземної підтримки та перевірки достовірності досліджень аерозолю в атмосфері Землі інструментами космічного проекту «Аерозоль-UА» [1].

ВИСНОВКИ

Проведено комп'ютерне моделювання елементів та частин оптико-механічного блоку бортового поляриметра «СканПол», а саме вузлів VIS та IR, вхідних об'єктивів та коліматорів, вузла призм Волластона, VIS- та IR-вузлів спектральної селекції і камерних об'єктивів, оптико-механічного блоку в цілому. Розроблено вихідні технічні вимоги до елементів спектральної селекції, а саме до дихроїчних дзеркал та інтерференційних світлофільтрів. Виготовлено конструкторську документацію макетного зразка оптико-механічного блоку бортового поляриметра «СканПол» для натурних випробувань та виготовлені основні вузли блоку. Виконано роботи зі створення макета багатоканального зчитувача оптичної інформації, зокрема розроблено та виготовлено модулі канальних світлоперетворювачів. Проведено дослідження блоку сканувальних дзеркал, результати якого показали, що використана комбінація дзеркал компенсує поляризацію при відбитті від металевого покриття. Розроблено основні етапи концепції алгоритму з відновлення параметрів аерозолю. Продовжено роботу над створенням методики і спостережних засобів для наземного контролю достовірності результатів космічного експерименту.

Роботу виконано за фінансової підтримки проекту 336Кт «Аерозоль-UA» (NAS) в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

- 1. Яцкив Я. С., Мищенко М. И., Розенбуш В. К. и др. Проект «Аэрозоль»: дистанционное зондирование аэрозолей в земной атмосфере со спутника // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 3—15.
- Bodhaine B., Wood N. B., Dutton E. G., Slusser J. R. On Rayleigh optical depth calculations // J. Atmos. Oceanic Technol. – 1999. – 16. – P. 1854–1861.
- Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Milinevsky G., et al. Aerosol Microtops II sunphotometer observations over Ukraine // Adv. Astron. Space Phys. – 2013. – P. 46–52.
- Bréon F. M., Tanré D., Lecomte P. Herman M. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. - 1995. -33. - P. 487-499.

- Chu D. A., Kaufman Y. J., Ichoku C., et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval overland // Geophys. Res. Lett. – 2002. – 29. – P. 1617 (4 p.).
- 6. *De Haan J. F., Bosma P. B., Hovenier J. W.* The adding method for multiple scattering calculations of polarized light // Astron. and Astrophys. 1987. **183**. P. 371–391.
- Dubovik O., Holben B. N., Eck F. T., et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. – 2002. – 59. – P. 590–608.
- Fan X., Goloub P., Deuze J.-L., et al. Evaluation of PAR-ASOL aerosol retrieval over North East Asia// Remote Sens. Environ. 2008. - 112. - P. 697-707.
- 9. *Hansen J. E., Travis L. D.* Light scattering in planetary atmospheres // Space Sci. Rev. 1974. **16**. P. 527–610.
- Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., et al. AERONET a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. –1998. 66. P. 1–16.
- Ichoku S., Chu D.A., Mattoo S., et al. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products // Geophys. Res. Lett. – 2002. – 29. – P. 1616 (4 p.).
- Kahn R. A., Gaitely B. J., Martonchik J. V., et al. Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident Aerosol Robotic Network (AERONET) observations // J. Geophys. Res. – 2005. – 110. – P. D10S04 (16 p.).
- Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban-industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – 7. – P. 1459–1474.
- Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent development of atmosphere research in Ukraine // Adv. Astron. Space Phys. – 2012. – 2. – P. 114–120.
- Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., et al. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory mission // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2007. – 88. – P. 677–691.
- Mishchenko M. I., Liu L., Geogdzhayev I. V., et al. Toward unified satellite climatology of aerosol properties.
 MODIS versus MISR versus AERONET // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2010. – 111. – P. 540– 552.
- Rodgers C. D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. — Hackensack, NJ: World Scientific Publ., 2000. — 238 p.
- Waquet F., Cairns B., Knobelspiesse K., et al. Polarimetric remote sensing of aerosols over land // J. Geophys. Res. – 2009. – 114. – 23 p. – D01206.

Стаття надійшла до редакції 17.12.14

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

И. И. Синявский¹, Г. П. Милиневский^{1,2}, Ю. С. Иванов¹, М. Г. Сосонкин¹, В. А. Данилевский², В. К. Розенбуш¹, А. П. Бовчалюк¹, А. А. Лукенюк³, А. П. Шымкив³, М. И. Мищенко⁴

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

³Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Львов ⁴Годдардовский институт космических исследований НАСА, Нью-Йорк, США

МЕТОДИКА, АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОДГОТОВКИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «АЭРОЗОЛЬ-UA»

Проведена подготовка к созданию комплекса научной аппаратуры эксперимента «Аэрозоль-UA», в частности поляриметра «СканПол», для изучения с борта космического аппарата глобального распределения физических свойств аэрозольных частиц и облачных образований в атмосфере Земли по измерениям поляризационных и спектральных характеристик рассеянного солнечного излучения. Выполнена разработка узлов макета поляриметра «СканПол», узлов оптико-механического блока и блока сканирующих зеркал, а также электронных узлов. Выполнены работы по созданию макета многоканального считывателя оптической информации, в частности разработаны и изготовлены модули канальных преобразователей света. Проведено предварительное исследование блока сканирующих зеркал, результаты которого показали, что предложенная комбинация зеркал компенсирует поляризацию при отражении от металлического покрытия. Разработана концепция алгоритма определения параметров аэрозоля над водной поверхностью, поверхностью Земли и облаками. Продолжена доработка методики работы мобильной станции валидации и

калибрования поляриметрических измерений аэрозоля для поддержки космического эксперимента.

Ключевые слова: космический эксперимент, исследование аэрозолей, поляриметр.

I. I. Syniavskyi¹, G. P. Milinevsky^{1,2}, Yu. S. Ivanov¹, M. G. Sosonkin¹, V. O. Danylevsky², V. K. Rosenbush¹, A. P. Bovchaliuk¹, A. A. Lukenyuk³, A. P. Shymkiv³, M. I. Mishchenko⁴

¹Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

²Taras Shevchenko National University of Kyiv

³ Lviv Centre of Institute for Space Research of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Lviv

⁴The NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, USA

METHODOLOGY, HARDWARE IMPLEMENTATION, AND VALIDATION OF SATELLITE REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC AEROSOLS: FIRST RESULTS OF THE AEROSOL-UA SPACE EXPERIMENT DEVELOPMENT

Preparations have been made for the development of the instrumentation suite for the space experiment Aerosol-UA (NAS), in particular, of the polarimeter ScanPol intended for remote-sensing studies of the global distribution of aerosol properties and clouds in the terrestrial atmosphere by means of polarimetric and spectral measurements of the scattered sunlight. Various components of the polarimeter ScanPol have been prototyped, including the optomechanical and electronics assemblies and the scanning mirror controller. The conceptual design of the algorithm for the retrieval of aerosol parameters over water and land surfaces and clouds has been developed. Methods for the validation of satellite data using a mobile sunphotometer station as well as for the calibration of aerosol polarimetry have been further refined.

Key words: space experiment, the study of aerosols, polarimeter.

УДК 551.510

I. В. Гала, Л. В. Козак

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ГРОЗОВІ РОЗРЯДИ В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ

Досліджується енергетика утворення грозової хмари та умови виникнення розряду. При аналізі механізмів утворення грозової хмари вказано на роль висхідних та конвективних процесів, ядер конденсації та високоенергетичних частинок. Розглянуто необхідні умови виникнення грозових розрядів при спостережуваній у хмарах напруженості електричного поля. Відмічено внесок в дане явище космічних променів високих енергій та пробою на втікаючих електронах. При цьому значну увагу приділено визначенню необхідних умов для виникнення даного пробою, зокрема розмірів грозових хмар та енергетики «затравочних» швидких електронів, значення яких для блискавок хмара — земля повинно перевищувати 10¹⁴ eB, а для появи міжхмарних блискавок — понад 10¹² eB. Проаналізовано значення зміни струму при пробої для двох «інженерних» моделей — модель Чо — Райкфорта та модель Стєкольникова. Отримано, що модель Чо — Райкфорта можна використовувати для опису характеристик пробою при висотних грозових розрядах, а модель Стєкольникова добре описує грозові розряди хмара — земля.

Ключові слова: грозові розряди в атмосфері Землі, утворення грозової хмари, умови виникнення пробою, космічні промені високих енергій, висотні грозові розряди.

вступ

Грозова хмара — локалізована область з різко вираженою конвективною та електричною активністю, вершина якої на середніх широтах лежить на висотах 8—12 км. Всі грозові хмари послідовно проходять стадії зародження, зрілості і розпаду. Стадія зародження характеризується наявністю досить потужних висхідних потоків теплого вологого повітря і появою перших блискавок. У стадії розвитку посилюються електрична активність, висхідні потоки і вологовміст хмари, а у стадії розпаду спостерігається згасання висхідних рухів повітря, зменшення електричної активності і випадання опадів [4, 6, 20].

Незважаючи на те, що вивчення теорії грозових розрядів бере початок з XVII-го століття, а спостереження за грозовими розрядами провадяться різними методами (фотографічними, електромагнітними, акустичними та ін.) та в усіх частотних діапазонах електромагнітних хвиль [20], досі головним недоліком усіх відомих розглядів є питання джерела енергії, яке могло б забезпечити розвиток грозової хмари та питання про утворення грозових розрядів (блискавки в хмарах з'являються при напруженості електричного поля не більше ніж 3 кВ/см, хоча пробивна напруга повітря на висотах утворення хмар складає 10—30 кВ/см) [7].

Ще більше питань виникає при аналізі висотних грозових розрядів, що простягаються від верхньої частини грозових хмар аж до висот 90—100 км і дають прямий доказ зв'язку нижніх шарів атмосфери з іоносферою [11, 19, 21].

Не менш важливим є усвідомлення ролі грозових розрядів як основних джерел електричного поля в тропосфері та стратосфері Землі [1].

Роботу присвячено аналізу проблемних тем фізики грозових розрядів.

[©] І. В. ГАЛА, Л. В. КОЗАК, 2015

ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ГРОЗОВИХ ХМАР

На сьогодні відомо кілька механізмів утворення грозових хмар, проте питання про забезпечення енергетики даного процесу все ще залишається відкритим [3, 6]. У процесі розвитку хмари з приземного шару атмосфери на висоту кілька кілометрів за час менше години піднімається велика кількість води, до $(2...4) \cdot 10^5$ тонн. Відомі механізми не дають відповіді, звідки береться енергія для даного процесу.

Необхідними умовами для виникнення грозової хмари є наявність умов для розвитку конвекції або іншого механізму, який створює висхідні потоки, запасу вологи, достатньої для утворення опадів, і наявності структури, в якій відбувається розділення зарядів. Конвекція, що призводить до розвитку хмар, виникає у таких випадках: при нерівномірному нагріванні приземного шару повітря над різною поверхнею; при підйомі або витісненні теплого повітря холодним на атмосферних фронтах; при підйомі повітря в районах гірських масивів.

Грозові хмари з'являються в областях, де швидкість висхідних потоків теплого, вологого і іонізованого повітря досягає декількох метрів за секунду. При цьому для зародження хмари важливу роль відіграють аерозольні частинки (діапазон від $5 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-5} см) — потенційні ядра конденсації водяної пари, та іонізація приземної атмосфери (над океанами іонізація відбувається за рахунок космічних променів, над континентами — за рахунок космічних променів та радіо-активних газів земної кори).

Важливим фактором є те, що вода — полярна рідина, і тому її коефіцієнт поверхневого натягу залежить як від величини, так і від знаку заряду ядра конденсації. Для негативно заряджених ядер значення цього коефіцієнта значно менше, ніж для позитивно заряджених. Тому ймовірність виникнення негативно заряджених зародків крапель у випадку невеликих перенасичень в атмосфері на порядки вища, ніж позитивно заряджених. У процесі конденсації краплі ростуть до розмірів 1—2 мкм. Надалі їхній ріст відбувається переважно за рахунок коагуляції. Під дією сил тяжіння рух крапель вгору сильно сповільнюється. У свою чергу, на позитивно заряджених ядрах процес конденсації вологи уповільнений (для цього потрібні значно більші перенасичення пари, які спостерігаються на значно більших висотах), і ці ядра разом з висхідним потоком повітря продовжують рух вгору. В результаті у хмарі відбувається макромасштабне просторове розділення зарядів з утворенням негативного об'ємного заряду внизу і позитивного — нагорі. Сам процес конденсації пари на ядрах відбувається без будь-яких втрат енергії. Навпаки, у процесі конденсації пари в атмосфері виділяється енергія — прихована теплота. Дана теплота, у свою чергу, сприяє посиленню висхідних потоків повітря і процесу поділу різнойменних зарядів, що зароджується в хмарі. Через поділ і зростання об'ємних зарядів у хмарі збільшується напруженість електричного поля, що сприяє посиленню процесу коагуляції крапель і тим самим підсилює процес розділення зарядів. Як тільки у хмарі напруженість досягає значень 2—3 кВ/см, у ній з'являються блискавки [7].

ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ У ГРОЗОВИХ ХМАРАХ: УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ПРОБОЮ ТА РОЛЬ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ

Оскільки розряди у хмарах виникають при напруженостях менших, ніж напруга пробою повітря на висотах утворення хмар, то для пояснення утворення грозових розрядів у атмосфері Землі на сьогоднішній день намагаються залучити явище пробою на «втікаючих» електронах (ПВЕ) та наявність космічних променів надвисоких енергій. Вперше на ймовірність утікання швидких електронів у атмосфері під впливом грозових полів вказав Вільсон [22]. Теоретично ж явище ПВЕ було вперше описано в роботі А. В. Гуревича та ін. в 1992 р. [14]. В його основі лежать особливості взаємодії швидких частинок з речовиною. Сила гальмування енергетичної частинки в речовині визначається іонізаційними втратами, які описуються формулами Бете [10]. Для нерелятивістського випадку значення сили гальмування має вигляд

$$F = \frac{2\pi e^4 Z N_m}{\varepsilon} \ln \frac{\varepsilon}{J_z},$$



Рис. 1. Залежність гальмівної сили від енергії електрона



Рис. 2. Залежність характерної довжини експоненціального росту лавини електронів від висоти

де є — енергія частинки, N_m — концентрація молекул, Z — середнє число електронів у молекулі, J_z — енергія $Z\varepsilon_i$, ε_i — енергія іонізації. Можна відмітити, що гальмівна сила зменшується зі зростанням енергії електрона і досягає мінімального значення

$$F_{\min} \approx \frac{138e^4 Z N_m}{mc^2}$$

при ε=1.4 МеВ.

Залежність гальмівної сили від енергії електрона подана на рис. 1.

Рух електрона у напрямку постійного електричного поля описується рівнянням

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = eE - F.$$

Дане рівняння можна переписати через кінетичну енергію електрона і таким чином оцінити зміну його енергії:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = e\sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}} \left\{ E - \frac{F}{e} \right\}$$

При E > F/e електрони прискорюються, а при E < F/e — сповільнюються.

Таким чином, при наявності в середовищі постійного поля з напруженістю

$$E > E_c = \frac{F_{\min}}{e} \approx \frac{138e^3 Z N_m}{mc^2} \tag{1}$$

в області зменшення сили тертя можуть генеруватись «втікаючі» електрони. При цьому електрон з енергією $\varepsilon > \varepsilon_c \approx E_c mc^2/2E$ буде прискорюватись даним полем.

Для атмосфери Землі вираз для критичного поля буде залежати від висоти, тому формулу (1) можна подати у вигляді

$$E_c \approx 2.16 p \left[\frac{\kappa B}{c_M}\right] = 216 p_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \left[\frac{\kappa B}{M}\right],$$
 (2)

де p — тиск повітря в атмосферах, p_0 — тиск на поверхні Землі, z — висота над рівнем моря, H — висота однорідної атмосфери.

Слід відмітити, що швидкі електрони в середовищі втрачають енергію переважно за рахунок іонізації молекул, внаслідок чого при іонізації з'являється новий електрон з енергією $\tilde{\varepsilon}$. При $\tilde{\varepsilon} \ge \varepsilon_c$ всі нові електрони також стають «втікаючими». Вираз для характерної довжини *l* експоненціального наростання кількості «втікаючих» електронів задається співвідношенням [2]

$$l = \frac{(mc^2)^2}{2\pi N_m Z e^4} \frac{E_c}{E}.$$

Для атмосфери Землі (повітря) отримаємо значення

$$l = 50 \cdot \left(\frac{2.7 \cdot 10^{19}}{N_m}\right) \frac{E_c}{E}.$$

Разом із «втікаючими» електронами за експоненціальним законом наростає й число повільних теплових електронів, яких зазвичай набагато більше, ніж «втікаючих». Це призводить до швидкого росту електропровідності середовища — до електричного пробою.

Графік зміни із висотою характерної довжини експоненціального наростання кількості «втікаючих» електронів представлено на рис. 2. Для побудови графіка використано значення концентрації молекул на різних висотах із стандартної моделі атмосфери (MSIS-90), дані отримано за вимірами ракетних зондів, значення напруженості ПВЕ для різних висот в атмосфері Землі розраховано за формулою (2). Як видно, в атмосфері біля поверхні Землі характерна довжина наростання лавини при ПВЕ складає декілька десятків метрів і з висотою вона ще більш зростає внаслідок зменшення концентрації.

Графік зміни залежності E_c/E з висотою подано на рис. 3. Можна відмітити поступове зростання відношення E/E_c до висот 15 км.

Звичайно основну роль відіграє можливість виникнення необхідного електричного поля, яка залежить від співвідношення генерації та релаксації.

Крім експоненціального зростання характерної довжини *l* із висотою, з висотою також зростає електропровідність середовища. Згідно із сучасними уявленнями електропровідність нижніх шарів атмосфери формується під впливом радіоактивного випромінювання поверхні Землі, радіоактивних домішок, що містяться у повітрі, космічного випромінювання. Із віддаленням від земної поверхні вона збільшується [1, 9]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha(r-r_0)}, \qquad (3)$$

де r_0 — радіус Землі, $1/\alpha = 6.4$ км, σ_0 — електропровідність на поверхні Землі.

В ряді випадків до висоти приблизно 40 км електропровідність (3) можна подати у вигляді

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 \exp\left(\frac{r-r_0}{0.82}\right), & 0 < r-r_0 < 3.6 \text{ KM}, \\ \sigma_1 \exp\left(\frac{r-r_0}{4.1}\right), & 3.6 < r-r_0 < 17.7 \text{ KM}, \\ \sigma_2 \exp\left(\frac{r-r_0}{7.0}\right), & 17.7 < r-r_0 < 40.0 \text{ KM}, \end{cases}$$

де $\sigma_1 = \sigma(3.6)$, $\sigma_2 = \sigma(17.7)$.

Графік залежності електропровідності атмосфери представлено на рис. 4.

Час релаксації електричного поля τ_E з висотою зменшується, оскільки він визначається провідністю повітря:

$$\tau_E = (4\pi\sigma)^{-1}$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3



Рис. 3. Залежність *Е_c/Е* від висоти в атмосфері Землі



Рис. 4. Залежність електропровідності атмосфери від висоти



Рис. 5. Зміна часу релаксації електричного поля з висотою

Незважаючи на те що електропровідність повітря буде визначатися в основному іонізацією за рахунок космічних променів, провідність у хмарі може знижуватись внаслідок прилипання електронів до крапельок води і аерозолів. Висотний розподіл часу релаксації електричного поля представлено на рис. 5. Таким чином, в умовах ПВЕ за декілька десятків секунд концентрація іонів збільшується на півтора-два порядки, а у деякій локалізованій області хмари — може навіть й більше. Виникає шар аномально високої провідності, що, звичайно, відіграє визначальну роль в електродинамічних процесах всередині хмари. Такі умови сприяють швидкому переносу заряду, який ми можемо спостерігати на практиці.

Розрізняють два механізми генерації електричного поля:

1. Звичайне плавне наростання електричного поля всередині і на границях хмар за рахунок дії вітрів, сили тяжіння і захоплення заряджених частинок крапельками води, частинками льоду, аерозолями. Характерний час такого процесу порядку 1—10 хв [15].

2. Генерація поля, пов'язана з різкою зміною заряду у хмарі внаслідок потужного електричного розряду. Характерний час цього процесу — мілісекунди [9, 16].

Порівнюючи характерні часи цих процесів з часом релаксації, можемо зробити висновок, що тільки у другому випадку можливе значне перевищення поля E над E_c . При цьому в області великих висот 20—50 км внаслідок швидкої релаксації поля умови ПВЕ можуть виконуватися тільки протягом досить короткого часу (<10 с). У першому випадку, навпаки, можуть виникати поля, що тільки трішки перевищують E_c , але час життя такого поля може бути досить довгим — до декількох хвилин.

Ймовірніше за все, перший механізм генерації електричного поля має місце на висотах до 10 км, де ПВЕ відбувається у м'якій формі багатьох мікропробоїв, що сильно впливає на електродинаміку грозової хмари і створює умови для генерації блискавок. При другому механізмі генерації може виникати сильний ПВЕ, наявністю якого можна пояснити висотні грозові розряди між грозовими хмарами та іоносферою [9, 16].

Таким чином, для виникнення пробою на втікаючих електронах необхідне виконання таких умов:

1) напруженість поля E повинна бути більшою за критичне значення $E \ge E_c$;

2) просторовий розмір L, на якому виконується перша умова, повинен суттєво перевищувати довжину експоненційного росту лавини $L \ge l$;

3) наявність «затравочних» швидких електронів з енергією $\varepsilon > \varepsilon_c = \frac{E_c}{2F}mc^2$.

Такі «затравочні» електрони виникають за рахунок наявності космічних променів надвисоких енергій (більше 10¹⁴ eB), які утворюють в атмосфері широку атмосферну зливу. Розряди проходять вздовж іонізованих слідів, які створюються вторинними частинками зливи. Середня густина потоку вторинних електронів на висоті 4-8 км досить велика (~ $10^3 \, \text{m}^{-2} \text{c}^{-1}$). Широке розгалуження іонізаційних слідів також сприяє поєднанню об'ємних зарядів у хмарі. Кількість електроніонних пар, що народжуються у слідах однієї електронної зливи, порядку 10²⁰...10²¹ пар іонів, а утворювані ними заряди протилежних знаків складають величину не менше $Q \approx 100$ Кл кожен [5]. Вторинні електрони космічних променів мають при цьому енергію до 30 МеВ і внаслідок розсіяння на ядрах рухаються у всіх можливих напрямках, залежно від знаку електричного поля, тобто пробій може розвиватися як вниз до Землі, так і догори, до іоносфери. Основну роль, як вказувалося вище, відіграє можливість народження необхідного електричного поля.

Характерна висота, де зароджуються блискавки хмара — земля (~5 км), відповідає характерній висоті максимумів числа частинок у зливах, утворених космічними променями з $\varepsilon \ge 10^{15}$ еВ. Частинки цих злив досягають поверхні землі. Характерна висота внутрішньохмарових блискавок (10 км) відповідає висоті максимуму загального числа злив, утворених космічними частинками з енергіями $\varepsilon \ge 10^{12}$ еВ.

Іншим важливим фактором є великі просторові масштаби грозових хмар, на яких задане електричне поле перевищує критичне. У грозових хмарах умова на масштаб зазвичай виконується досить добре. Характерні розміри хмар L перевищують масштаб експоненційного росту лавини l.

Таким чином, коли електричне поле E у грозовій хмарі досягає E_c , процес ПВЕ може розвиватися.

МОДЕЛІ ОПИСУ ЕФЕКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОБОЮ

Блискавка, як і в лабораторних умовах, починається лідером (термоіонізований канал із високою провідністю) і завершується зворотним (головним) розрядом. Швидкість опускання лідера першого одиничного розряду дорівнює приблизно 1500 км/с, швидкості наступних розрядів досягають значень 1/2 швидкості світла.

Основною кількісною характеристикою блискавки є струм, який характеризується максимальним значенням, середньою крутизною фронту і тривалістю імпульсу, що дорівнює часу зменшення струму до половини максимального значення.

Тривалість імпульсу струму блискавки в основному визначається часом поширення зворотного розряду від землі до хмари, тому змінюється у відносно вузьких межах від 20 до 80—100 мкс. Середня тривалість імпульсу струму блискавки близька до 50 мкс. Параметрами, найбільш важливими з точки зору оцінок грозової активності, є [7, 18]:

• величина заряду, що переноситься блискавкою (0.1—10 Кл);

струм у каналі блискавки (від декількох до сотень кілоампер);

• число повторних ударів по одному каналу;

• інтенсивність грозової діяльності;

Всі ці параметри визначаються не однозначно і носять імовірнісний характер.

Для опису ефективних параметрів блискавки використовують підхід «інженерної моделі» [12, 17]. Він дозволяє визначити характеристики пробою, не акцентуючи увагу на фізичному описі процесів. При цьому струм у основі пробою задається співвідношенням

$$I(t) = \sum_{k} I_{k} \exp\left(\frac{t}{t_{k}}\right), \ t \ge 0, \tag{4}$$

де I_k і t_k — амплітуди і характерні часи доданків, пробій починається у момент часу t = 0.

Зазвичай максимум струму пробою досягається в інтервалі від 5 до 10 мкс від його початку [12]. Досягнувши максимального значення, струм спадає з часом. Відмінності різних «інженерних моделей» полягають у кількості членів суми (4), вибраних значеннях амплітуд та характерних часів. Для розгляду зміни струму при пробої розглянемо дві моделі: модель Чо — Райкрофта, що дозволяє описати характеристики пробою при висотних грозових розрядах, та модель Стєкольникова, яка добре описує спостережувані грозові розряди між хмарою і землею.

Модель Чо — Райкрофта. Ця модель була запропонована в роботі [13] для опису так званих «червоних спрайтів» — оптичне світіння з волокнистою структурою, що виникає у середній атмосфері над грозовою хмарою. У рамках даної моделі для пояснення імпульсного оптичного світіння зміна струму задається співвідношенням [13]

$$I(t) = \frac{Qt}{12\tau^2} \exp\left(-\sqrt{\frac{t}{\tau}}\right),$$

де *Q* — величина заряду, що переноситься блискавкою, т — час розрядки.

Дана формула дозволяє описати «додатні» пробої (звичайна блискавка являє собою «негативний» пробій, коли з хмари на землю перетікає негативний електричний заряд). Нормувальний множник 12 у знаменнику визначається з граничних умов і забезпечує отримання повного заряду Q при інтегруванні струму по часу. Характер змін струму залежить від параметрів Q і τ , а максимум досягається у момент часу $t = 4\tau$.

Розрахована у роботі зміна струму показана на рис. 6 та 7. При цьому на рис. 6 приведено залежність струму при різних часах розрядки $\tau = 15$, 25 та 35 мкс, а на рис. 7 — зміни струму з часом у залежності від величини заряду в каналі блискавки. Серед результатів можна відмітити, що у моделі Чо — Райкфорта максимальне значення струму досягається через 100 мкс, що значно пізніше, ніж у класичних моделях (5—10 мкс), а величина заряду, що переноситься на Землю, істотно вища (максимальний струм при Q = 200 Кл перевищує 360 кА). Отримані результати добре узгоджуються зі спостережними значеннями спрайтів, що є проявами висотних розрядів у атмосфері Землі [19].

Модель Стекольникова. У моделі Стєкольникова грозовий пробій починається ступінчастим лідером, який формує плазмовий канал, що переносить заряд із хмари до землі.

Перша відмінність моделі Стєкольникова від звичайної «інженерної моделі» у тому, що почат-



Рис. 6. Зміни струму в основі пробою з часом для моделі Чо — Райкрофта ($1 - \tau = 15$ мкс, $2 - \tau = 25$ мкс, $3 - \tau = 35$ мкс)



Рис. 7. Зміни струму в основі пробою з часом для моделі Чо — Райкрофта при різних значеннях величини заряду в каналі блискавки (1 - Q = 100 Кл, 2 - Q = 200 Кл, 3 - Q = 300 Кл)

кова швидкість хвилі струму суттєво менша [8]. Друга відмінність полягає у тому, що струм визначається вихідним розподілом заряду по каналу лідера і швидкістю руху «хвилі» струму:

I(x) = Q(x)V(x),

де I(x) — струм розряду як функція координати *x*, яка вимірюється від поверхні Землі, V(x) — швидкість руху фронту «хвилі» струму, Q(x) — густина заряду, накопиченого в лідері і розподіленого по каналу пробою експоненціально: $Q(x) = Q_0 \exp(-ax)$. При цьому Q_0 — початкова густина заряду (біля земної поверхні), а константа a — висотний масштаб. Швидкість V(x) наростає з висотою до швидкості хвилі струму головного пробою за законом [17]:

$$V(x) = V_k(\eta - \exp(-bx)),$$

де V_k — кінцеве значення швидкості, а параметр η визначає початкову швидкість, що дорівнює 1 % від її кінцевого значення, тому η = 1.01. У роботах [8, 17] збільшення швидкості руху по каналу пробою пояснють збільшенням різниці потенціалів між зарядженою хмарою і нульовим потенціалом Землі. Залежність струму пробою від координати фронту «хвилі» у рамках моделі Стєкольникова задається співвідношенням [8]

 $I(x) = Q_0 V_k \exp(-ax)(\eta \exp(-ax) - \exp(-(a+b)x)).$

При цьому відстань *x*, яку пройшла хвиля струму, залежить від часу:

$$x = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{1}{\eta} (\exp(V_k bt)(\eta - 1) + 1) \right).$$

Для чисельного моделювання зміни струму з часом у моделі Стєкольникова було використано такі значення параметрів: $V_{\kappa} = 10^7$ м/с, a = 0.003 м⁻¹ і b = 0.03 м⁻¹ [17].

Залежність струму в основі пробою в залежності від початкової густини заряду Q_0 , розраховану по моделі Стєкольникова, подано на рис. 8. Слід відмітити, що лише незначна зміна початкової густини зарядів біля земної поверхні призводить до стрибка максимального струму майже на порядок величини. Блискавка у моделі Стєкольникова переносить на землю невеликий заряд:

$$Q_{\infty} = \int_{0}^{\infty} Q_0 \exp(-ax) dx = \frac{Q_0}{a} = 1 \text{ Km}$$

Це значно менше, ніж у моделі Чо — Райкфорта (200 Кл). Максимальний струм у моделі Стєкольникова (20 кА) досягається через 23 мкс після початку пробою. Це значення є близьким до верхньої межі значень, отриманих у результаті спостережень [7, 18], але суттєво менша, ніж для опису висотних грозових розрядів [16, 19].

ВИСНОВКИ

1. Для формування грозових хмар необхідна іонізація приземного шару атмосфери та висхідні потоки теплого та вологого повітря з наявністю ядер конденсації.

2. В основу механізму формування грозових хмар покладено два основних положення:

• конденсація вологи на негативно заряджених ядрах починається при менших перенасиченнях пари, ніж на позитивно заряджених. Ця обставина пояснює наявність різнойменних зарядів у хмарі та їхній макромасштабний розподіл;

• у процесі конденсації пари в атмосферу виділяється енергія — прихована теплота.

3. Аналіз умов виникнення пробою у грозових хмарах показав, що:

• безпосередньо до зриву квазістаціонарного стану, визначеного дією електричного та гравітаційного полів, причетні спільні дії ПВЕ та високоенергетичних космічних частинок надвисоких енергій, які утворюють в атмосфері широкі атмосферні зливи;

• основну роль відіграє можливість виникнення електричного поля, більшого за критичне значення (значення суттєво змінюються з висотою за рахунок електропровідності атмосфери);

• блискавки проходять по іонізованих слідах космічних променів. Вони з'являються при напруженості електричного поля у хмарі приблизно 3 кВ/см, що на порядок нижче за напругу пробою повітря при нормальних умовах, мають ступінчасту (або зигзагоподібну) форму;

• характерна висота, де зароджуються блискавки «хмара — земля» (~5 км), відповідає характерній висоті максимумів кількості частинок у зливах, утворені космічними променями з ε>10¹⁵ eB (частинки цих злив досягають поверхні землі). Характерна висота внутрішньохмарових блискавок (~10 км) відповідає висоті максимуму загального числа злив, утворених космічними частинками з $\varepsilon > 10^{12} \text{ eB};$

• просторові розміри хмар повинні перевищувати масштаб експоненційного росту лавини електронів при ПВЕ.

4. Аналіз «інженерних» моделей блискавок показав, що:

 в моделі Чо — Райкрофта максимальне значення струму досягається через 100 мкс, а величина заряду суттєво вища за 1 Кл (100-200 Кл). Таким чином, дана модель добре описує спостережні прояви від висотних грозових розрядів;



I, кА

16

Стекольникова при різних значеннях початкової густини заряду біля земної поверхні ($1 - Q_0 = 1$ мКл, $2 - Q_0 =$ $= 2 MK\pi, 3 - Q_0 = 3 MK\pi$)

• в моделі Стєкольникова максимальне значення струму в каналі блискавки дуже сильно корелює зі значенням початкової густини заряду біля поверхні землі, а характерні струми і заряди відповідають спостережним значенням грозових розрядів хмара — земля.

- 1. Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю. С. Седунова, С. И. Авдюшина, Е. П. Борисенкова и др. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 510 с.
- 2. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // Успехи физ. наук. — 2001. — 179, № 11. — С. 1177— 1199.
- 3. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Хворостьянов В. И. Облака и климат. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 512 с.
- 4. Матвеев Л. Т. Общая метеорология. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 751 с.
- 5. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. М.: МГУ, 1988. — 319 с.
- 6. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 647 c.
- 7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: ИД Интеллект. 2009. — 736 с.
- 8. Стекольников И.С. Физика молнии и грозозащита. М.: АН СССР, 1943. — 230 с.
- 9. Шуєнко О. В., Козак Л. В., Івченко В. М. Швидкоплинні оптичні явища під час гроз та моделювання електричних полів у нижній атмосфері // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 2. — С. 23—34.

- Bethe H. Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie // Ann. Phys. — 1930. — 397, N 3. — P. 325—400.
- Blanc E., Farges T., Roche R., Brebion D., Hua T., Labarthe A., Melnikov V. Nadir observations of sprites from the International Space Station//J. Geophys. Res.: Space Phys. – 2004. – 109, A02306. – doi:10.1029/2003JA009972.
- Bruce C. E. R., Golde R. H. The lightning discharge // J. Inst. Electr. Eng. – 1941. – 88. – P. 487–520.
- Cho M., Raycroft M. J. Computer simulation of the electric field structure and optical emission from cloud top to the ionosphere // J. Atmos. Solar Terr. Phys. – 1998. – 60. – P. 871–888.
- Gurevich A. V., Milikh G. A., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. – 1992. – 165, N 5–6. – P. 463–468.
- MacGorman D. R., Rust W. D. The Electrical Nature of Storms. — New York: Oxford Univ. Press, 1998. — 600 p.
- Pasko V. P., Stanley M. A., Mathews J. D., et al. Electrical discharge from a thunderstorm top to the lower ionosphere // Nature. - 2002. - 416. - P. 152–154.
- 17. *Rakov V. A., Uman M.* Lightning physics and effects. Cambridge UK: Univ. Press, 2003. 687 p.
- Rakov V. A., Uman M. A., Rambo K. J. A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida // Atmos. Res. - 2005. -76, N 1-4. - P. 504-518.
- Sprites, elves and intense lightning discharges / Eds M. Füllekrug, E. A. Mareev, M. J. Rycroft // Nato Sci. Ser. II. – 2006. – 225. – 398 p.
- 20. *Uman M. A.* The art and science of lightning protection. Cambridge: Univ. Press, 2008. 239 p.
- Wescott E. M., Sentman D. D., Stenbaek-Nielsen H. C., et al. New evidence for the brightness and ionisation of blue starters and blue jets // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2001. 106, N A10. P. 21549–P. 21554.
- Wilson C. T. R. The electric field of a thundercloud and some of its effects // Proc. Phys. Soc. London. - 1925. -37. - P. 32D-P. 37D.

Стаття надійшла до редакції 23.10.14

И. В. Гала, Л. В. Козак

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

ГРОЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Исследуется энергетика образования грозового облака и условия возникновения разряда. При анализе механизмов образования грозового облака указано на роль восходящих и конвективных процессов, ядер конденсации и высокоэнергетических частиц. Рассмотрены необходимые условия возникновения грозовых разрядов при наблюдаемой в облаках напряженности электрического поля. Отмечена роль в данном явлении космических лучей высоких энергий и пробоя на убегающих электронах. При этом значительное внимание уделено определению необходимых условий для возникновения данного пробоя, включая размеры грозовых облаков и энергию «затравочных» быстрых электронов, значение которой для молний облако — земля должно превышать 10¹⁴ эВ, а для появления молний облако — облако — 10¹² эВ. Проанализировано значение изменения тока при пробое для двух «инженерных» моделей — модель Чо — Райкфорта и модель Стекольникова. Получено, что модель Чо — Райкфорта можно использовать для описания характеристик пробоя при высотных грозовых разрядах, а модель Стекольникова хорошо описывает грозовые разряды облако — земля.

Ключевые слова: грозовые разряды в атмосфере Земли, образование грозового облака, условия возникновения пробоя, космические лучи высоких энергий, высотные грозовые разряды.

I. V Gala, L. V. Kozak

Kyiv National Taras Shevchenko University

LIGHTNING IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

The paper analyzes the problematic topics of lightning physics, i. e., the energy of storm cloud formation and conditions for the origin of discharge. In analyzing the mechanisms of formation of a storm cloud, we pointed to the specific role of ascending and convective processes, condensation nuclei, and high-energy particles in these processes. Conditions of appearance of lightning discharges in the clouds depending on the electric field intensity are considered. Cosmic rays of high energy and break-through on runaway electrons are shown to be of importance in this phenomenon. Considerable attention was given to the determination of the conditions necessary for the appearance of such a break-through, including storm cloud size and energy of inoculating fast electrons; the energy of such electrons has to exceed 1014 eV for cloud-ground lightnings and 1012 eV for cloud-cloud ones. In addition, the value of the current change in the break-through is analyzed for two "engineering" models, namely, model of Cho-Raycfort and model of Stekolnikov. We have found that the model of Cho-Raycfort can be used for describing the break-through characteristics in high-altitude lightning discharges, and the model of Stekolnikov describes well the cloud-to-ground lightning discharges.

Key words: lightning in the atmosphere, the formation of storm clouds, conditions of break-through, cosmic rays of high energy, high-altitude lightning.

УДК 528.88:551.583

В. І. Лялько, Л. О. Єлістратова, О. А. Апостолов

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСУХИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ТА МЕТЕОРОЛОГІЧНИМИ ІНДЕКСАМИ НА ПРИКЛАДІ 2007 РОКУ В УКРАЇНІ

Виконано порівняння посухи (поширення та інтенсивність) за 2007 рік на території України, визначеної за метеорологічним та супутниковим індексами. На базі наземних даних використано метеорологічний індекс — гідротермічний коефі ціснт Селянинова, а на основі супутникових даних — індекс посухи. Розкрито особливості поширення та інтенсивність засухи, встановлені в результаті спільного аналізу.

Ключові слова: посуха, кліматичні зміни, гідротермічний коефіцієнт Селянинова, індекс посухи, TERRA/MODIS, дистанційне зондування Землі.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

В умовах нестаціонарності клімату можливість збільшення його екстремальності, особливо недостатнє та нестабільне зволоження, викликають особливу занепокоєність. Екстремальність клімату все частіше проявляється у повторюваності посух, ніж у надлишковому зволоженні.

З другої половини 1980-х рр. у світову практику моніторингу посух стали впроваджуватися індекси, побудовані на супутниковій інформації. Відомо приблизно 100 супутникових індексів посух [1]. Цікавість до аналізу посух за супутниковими даними в Україні посилилась після значної за площею посухи 2007 р., а також досить теплих та посушливих 2009 та 2010 рр. Але визначення характеристик значних та сильних посух (за площею, інтенсивністю, тривалістю) на основі спільного аналізу метеорологічних і супутникових даних в Україні ще не проводилось. Мета даної роботи полягає у виявлені характеристики посух за 2007 рік на території України, визначених за метеорологічним (ГТК) і супутниковим (ID) індексами.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В Україні вивченням посух за наземними метеорологічними даними присвячені роботи науковців: І. О. Бучинського (1970 р.), К. Т. Логвінова (1972 р.), В. П. Дмитренко (2001 р.), М. І. Кульбіди (2003 р.), М. Б. Барабаш (2004 р.), Т. І. Адаменко (2005 р.). Систематичний дистанційний моніторинг засух провадиться в НЦ ЦАКДЗ ІГН НАН України [2]. Застосування спільного аналізу дозволить значно підвищувати ефективність заходів боротьби з посухами. Разом наземні та супутникові дослідження посух можуть дати більш об'єктивний результат.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Територія дослідження охоплює всю рівнинну частину України, що включає основні зерно-

посівні райони і прилеглі до них пасовища. У дослідженні порівнюється поширення та інтенсивність посухи за метеорологічним показником — гідротермічним коефіцієнтом Селянинова (ГТК). Цей коефіцієнт зволоження дорівнює відношенню суми опадів до 0.1 суми температур за період часу з температурою вище за 10 °С. Цей показник має перевагу над іншими — характеризує не тільки прибуткову частину водного балансу (опади), а й непродуктивну витрату вологи (випаровуваність ($E_0 = 0.1\Sigma T$) з поверхні ґрунту, рослинності). ГТК є достовірним показником зволоження в тих районах, для яких характерний однорідний тип річного ходу опадів. Окрім того, він об'єктивний і працює в достатньо широкому діапазоні температур та опадів. Зволоження вегетаційного періоду істотно надмірне з $\Gamma TK \ge 2.0$. Установлено такі критерії, які характеризують інтенсивність засух: ГТК < 0.5 — різка нестача опадів, сильна засуха; $\Gamma TK = 0.6...0.7$ недостатнє зволоження (дуже посушливо); 0.8... 0.9 — посушливо (засуха не інтенсивна); 1.0... 1.2 — недостатня вологість; 1.3...1.6 — помірна вологість; ГТК > 1.7 — надмірна вологість [3]. Значення ГТК вираховувалось за середньомісячними температурами повітря та сумами опадів за даними 46 метеостанцій України для 2007 р.

Для вивчення посухи за супутниковими даними в роботі використовувався індекс посухи *ID* (Index of Drought) [4]. Для визначення індексу *ID* було отримано два продукти з супутниками TERRA/MODIS: MOD11C3 та MOD13C2. Продукт MOD11C3 має денну та нічну місячну температуру з просторовим розрізненням 0.05° , продукт MOD13C2 — місячні дані двох вегетаційних індексів *NDVI* та *EVI*, а також місячні спектральні дані в каналах blue, red, NIR та MIR з просторовим розрізненням 0.05° .

Для дослідження було обрано 2007 р., коли була сильна посуха. Через мережу internet було отримано сім продуктів MOD11C3 та сім продуктів MOD13C2 за місяці квітень — жовтень. Таким чином, в роботі використовувались 14 продуктів. Вся робота з продуктами MOD11C3 та MOD13C2 виконувалась за допомогою програмного забезпечення «Erdas Imagine». У програмі «Erdas Imagine» були виконані такі роботи: перетворення даних з формату «hdf» на формат «img», прив'язування даних продукту MOD13C2 до географічної системи координат та розрахунок значень індексу посухи за допомогою засобів «Erdas Imagine», а саме «Spatial Modeler / Model Maker».

Супутниковий індекс посухи *ID* розраховується за формулою

$$ID = (T_{\pi} + T_{\mu})/NDVI,$$

де $T_{_{\rm H}}$, $T_{_{\rm H}}$ — денна та нічна температури, *NDVI* — нормалізований вегетаційний індекс.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

З допомогою індексу ID було досліджено поширення та інтенсивність посухи 2007 р. з моменту зародження і до затухання. Посуха 2007 р. виникла у активний період вегетації рослин з першої декади травня та середини червня і охопила всі південні райони України. Розрахунки ГТК також показали сильну посуху у ці місяці переважно на півдні, південному сході, у центральному та східному лісостепу. Під час посухи 2007 р. значення розрахованого індексу ID були досить значні в липні та серпні. Розрахунки ГТК підтвердили спалахи посухи у ці місяці. Опис розвитку посухи 2007 р. за даними супутникового індексу ID не суперечить в загальних рисах опису, складеному за метеорологічним індексом, але доповнює його важливими деталями. Локалізація спалахів за двома індексами збіглася. Але важливо відмітити деякі моменти.

На рисунку градаціями сірого показано інтенсивність посухи за усередненими з квітня по жовтень значеннями індексу ID (*a*) та інтерпольований у вузлах сітки індекс ГТК за цей же період (δ). Обидва розподіли індексів ГТК та IDмають схожі риси. Але слід відмітити, що наземні вимірювання на станціях точкові. Через велику відстань між станціями ми отримали кільцевий ефект поблизу метеостанцій, а також смуги субмеридіонального розподілу значень ГТК (δ).

Переваги запропонованого індексу *ID* у порівнянні з метеорологічним індексом ГТК очевидні: внаслідок сильної розрідженості метеосітки індекс *ID* детальніше відображає поширення та інтенсивність по території, ніж метеорологічний індекс. ГТК не враховує особливості підстиль-



Карта розподілу індексів: a — індекс посухи *ID* за квітень — жовтень, δ — ГТК за травень — вересень

ної поверхні (ліс, водну поверхню та ін.). Індекс ГТК виявляє метеорологічну посуху, індекс *ID* сільськогосподарську посуху. За дослідженнями [4] не завжди метеорологічна посуха призводить до сільськогосподарської. Це видно з рисунку, де за даними станцій Чернігів, Семенівка індекс ГТК фіксує посуху, а за даними індексу *ID* рослинність не відчувала явного впливу. За обома індексами виділяється південь (зерновий район країни) зі спалахами екстремальної посухи. Екстремальні аномалії температури посухи 2007 р. можна пояснити тим, що іноді у теплий період у Європейському секторі циркуляції відбувається вихід теплого сухого повітря з півдня у меридіональному напрямку. Тривалість дії цієї південної складової меридіональної циркуляції збільшилася. Цей процес нетривалий, і через деякий час його підсилює вторгнення сухого повітря з півночі. Такий складний процес, як правило, зумовлює сильну посуху у повітрі і ґрунті [5].

ВИСНОВОК

Спільний аналіз метеорологічного і супутникового індексів посухи відкриває нові можливості у дослідженні причин виникнення посухи, виявлення особливостей поширення, а особливо деталізації на території інтенсивності посухи. Перевагою індексу посухи ID є його властивість враховувати характер підстильної поверхні, яку не можна достатньо дослідити і врахувати при вивченні посухи за метеорологічними даними. В цілому отримані результати засвідчили принципову можливість ефективного використання дистанційних даних для визначення посухи та оцінки вологозабезпечення екосистем та агрофітоценозів у межах значних регіонів. Такий підхід можна використати для проведення моніторингових екологічних досліджень у межах різних ландшафтно-кліматичних зон всієї території України.

- 1. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Виноградова В. В. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. — 2013. — 10, № 1. — С. 246—253.
- Клімат України: у минулому ... і майбутньому? / За ред. М. І. Кульбіди, М. Б. Барабаш. — К.: Сталь, 2009. — С. 85—98.
- Лялько В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М. та ін. Контроль площ та стану озимих культур за допомогою знімків MODIS/TERRA та SPOT XI (на прикладі Київської області) // Доп. НАН України. — 2007. — № 3. — С. 122—127.
- Мартазинова В. Ф., Сологуб Т. А. Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX столетия // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2000. — Вип. 248. — С. 36—48.

 Щербенко Е. В. Мониторинг засухи по данным космических съемок. — Режим доступу до матеріалів: http:// d33.infospace.ru/d33_conf/vol2/395-407.pdf

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

В. И. Лялько, Л. А. Елистратова, А. А. Апостолов

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАСУХИ ПО СПУТНИКОВЫМ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ИНДЕКСАМИ НА ПРИМЕРЕ 2007 ГОДА В УКРАИНЕ

Выполнено сравнение засухи (распространение и интенсивность) за 2007 год на территории Украины, определенной по метеорологическим и спутниковым индексами. На базе наземных данных использовано метеорологический индекс — гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), а на основании спутниковых данных — индекс засухи ID (index of Drought). Показаны особенности распространения и интенсивности засух, установленные в результате совместного анализа.

Ключевые слова: засуха, климатические изменения, гидротермический коэффициент Селянинова, индекс засухи, TERRA/MODIS, дистанционное зондирование Земли.

V. I. Lyalko, L. A. Elistratova, A. A. Apostolov

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

COMPARATIVE RESEARCHES OF A DROUGHT USING SATELLITE AND METEOROLOGICAL INDEXES FOR 2007 WITHIN UKRAINE AS AN EXAMPLE

The comparison of droughts (distribution and intensity), determined from the meteorological satellite indices for 2007 within the territory of Ukraine, has been performed. It's used a meteorological index — a hydrothermal coefficient by Selyanynov, created on the basis of ground data, and drought index ID (index of Drought) made on the basis of satellite data. The features of the distribution and intensity of droughts, which have been established as a result of joint analysis, have been discussed.

Keywords: drought, climatic changes, hydrothermal coefficient of Selyninova, index of drought, TERRA/MODIS, remote sensing of the Earth.

УДК 004.62, 004.67

Н. М. Куссуль^{1,3}, А. Ю. Шелестов^{1,2,3}, С. В. Скакун⁵, Р. М. Басараб^{1,2,5}, Б. Я. Яйлимов^{1,2}, М. С. Лавренюк^{1,4}, А. В. Колотій^{1,2,3}, Д. Ю. Яшук^{1,2}

1 Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

та Державного космічного агентства України, Київ

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

⁴Київський національний університет імені Тараса Шевченка

⁵ТОВ «Інтеграція-Плюс», Київ

РЕТРОСПЕКТИВНА РЕГІОНАЛЬНА КАРТА ЗЕМНОГО ПОКРИВУ ДЛЯ УКРАЇНИ: МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Пропонується методологія побудови ретроспективних карт земного покриву для території України, заснована на використанні інтелектуальних методів обробки супутникових даних, а саме нейромережевої класифікації часових рядів космічних знімків супутників «Landsat-4», «Landsat-5», «Landsat-7». Отримано карти грунтово-рослинного покриву для всієї території України за 1990, 2000 і 2010 рр. з середньою точністю класифікації 95 % (отриманою на незалежній тестовій вибірці).

Ключові слова: ДЗЗ, картографування, класифікація, нейронні мережі, супутникові зображення.

ВСТУП

Карти земного покриву (land cover maps) відіграють важливу роль для осмислення динаміки екосистем та розв'язання багатьох задач супутникового моніторингу. Зокрема, такі карти необхідні для визначення змін та тенденцій у землекористуванні, підвищення точності класифікації та оцінки площ, аналізу кліматичних змін та їхнього впливу на біосферу тощо.

Глобальні набори даних щодо земного покриву на основі супутникової зйомки почали будувати у 1980-х рр. Як правило, такі карти мали низьке геопросторове розрізнення і не відзначалися високою точністю. Детальний аналіз історії картографування земного покриву наводиться в роботі [10].

Побудова карт на основі даних низького розрізнення спричиняє недооцінку або переоцінку площ певних типів земного покриву чи їхніх змін. Тому з появою у вільному доступі часових рядів даних супутника «Landsat» надзвичайно актуальною стала задача побудови глобальних і регіональних карт земного покриву на основі супутникових зображень високого (30 м) просторового розрізнення. Причому важливою особливістю такої задачі є побудова карт з певною періодичністю, що дозволить аналізувати зміни земного покриву та їхій вплив на біофізику, біогеографію земної поверхні та атмосфери та інші глобальні процеси в екосистемах. В 2013—2014 рр. з'явилось кілька таких карт [1, 7], які в роботі USGS [10] названі картами «нового покоління». Проте навіть за умови валідації цих глобальних карт на численних географічно розподілених полі-

[©] Н. М. КУССУЛЬ, А. Ю. ШЕЛЕСТОВ, С. В. СКАКУН, Р. М. БАСАРАБ, Б. Я. ЯЙЛИМОВ, М. С. ЛАВРЕНЮК, А. В. КОЛОТІЙ, Д. Ю. ЯЩУК, 2015



Рис. 1. Композит Color InfraRed зображення KA «Landsat-7 ETM+» (10.05.2000) над Запорізькою областю (Path 177 Row 027)

Таблиця 1	. Основні характеристики	даних КА	«Landsat»
-----------	--------------------------	----------	-----------

гонах їхня точність для конкретних регіонів є недостатньо високою.

Тому актуальною є задача побудови регіональних карт земного покриву з просторовим розрізненням 30 м для обраних проміжків часу. Автори побудували такі карти земного покриву для території України на основі даних супутників «Landsat-4», «Landsat-5», «Landsat-7» за 1990, 2000 та 2010 рр. Це дозволяє оцінити загальні тенденції змін землекористування в Україні за останні 25 років. Нижче обговорюється методологічний підхід до побудови ретроспективних карт земного покриву на основі даних супутників родини «Landsat», включаючи всі стадії підготовки супутникових, навчальних та валідаційних даних, метод класифікації та аналіз отриманих результатів.

СУПУТНИКОВІ ДАНІ

При розв'язанні задачі побудови карт земного покриву території України використано дані космічних апаратів (КА) родини «Landsat». Безкоштовні продукти обробки супутникової інформації, використані в даному дослідженні, отримано з геопорталу геологічної служби США (United States Geological Survey) [2].

Для оцінювання динаміки зміни земного покриву на території України обрано 1990, 2000 та

KA	Спектральний канал, просторова роздільна здатність	Розміри сцени
«Landsat-4»	Band 1 Blue (0.45-0.52 мкм) 30 м	185 × 172 км
«Landsat-5»	Band 2 Green (0.52—0.60 мкм) 30 м	
	Band 3 Red (0.63—0.69 мкм) 30 м	
	Band 4 NIR (0.76—0.90 мкм) 30 м	
	Band 5 NIR (1.55—1.75 мкм) 30м	
	Band 6 Thermal (10.40—12.50 мкм) 60 м	
	Band 7 Mid-Infrared (2.08—2.35 мкм) 30 м	
	Band 8 PAN (0.52—0.90 мкм) 15 м	
«Landsat-7»	Band 1 Blue (0.45—0.52 мкм) 30 м	170 × 185 км
	Band 2 Green (0.52—0.60 мкм) 30 м	
	Band 3 Red (0.63—0.69 мкм) 30 м	
	Band 4 NIR (0.77—0.90 мкм) 30м	
	Band 5 NIR (1.55—1.75 мкм) 30 м	
	Band 6 Thermal (10.40—12.50 мкм) 60 м	
	Band 7 Mid-Infrared (2.08—2.35 мкм) 30 м	
	Band 8 PAN (0.52—0.90 мкм) 15 м	

2010 pp., оскільки саме ці проміжки часу є репрезентативними та дозволяють оцінити динаміку змін землекористування найбільш ефективно. Основні характеристики наявних архівних даних сенсорів TM та ETM супутників «Landsat-4», «Landsat-5» та «Landsat-7» наведено в табл. 1.

При побудові карт земного покриву використовуються дані «Landsat» видимого (Band 1, 2, 3), ближнього інфрачервоного (Band 4, 5) та середнього інфрачервоного (Band 7) спектрів з просторовою роздільною здатністю 30 м.

Для супутникових зображень виконуються наступні етапи попередньої обробки:

• радіометрична та геометрична корекція, ортотрансформування, атмосферна корекція (використовуються продукти USGS);

• кожне супутникове зображення перепроектовується у проекцію з рівновеликими площами (Albers Equal Area Projection) для території України;

 для покращення якості даних у випадку їхньої значної захмареності та наявності часового ряду знімків виконується процедура їхнього відновлення відповідно до методики [22].

В дослідженні використано продукт атмосферної корекції даних сенсорів ТМ та ЕТМ+, створений на основі продуктів рівня обробки L1Gt, або L1T [6], які в свою чергу є радіометрично та геометрично скорегованими даними, що надаються в форматі GeoTIFF.

Для перепроектування супутникових зображень використано бібліотеку GDAL [23]. Приклад результату атмосферної корекції даних «Landsat-7 ETM+» зображено на рис. 1.

В подальшому саме композити Color InfraRed використано при формуванні навчальних вибірок на основі фотоінтерпретації зображень. Загалом, для побудови карт земного покриву для 1990, 2000 та 2010 рр. всього було використано 463 супутникові зображення (табл. 2).

Точність класифікації земної поверхні напряму залежить не тільки від якості використаних даних, а й від їхньої кількості. У випадку, коли для цільової території отримано відповідний часовий ряд зображень, є можливість врахування динаміки змін земної поверхні і, таким чином, підвищення якості інтерпретації даних. Це дозволяє точніше ідентифікувати такі типи поверхні як луг, воду (виокремити постійні водойми від тимчасово затоплених територій), відділити озимі культури від ярих тощо. Кількісні харак-

T.C	^	!!!			··· X7 ···
I_{AD}	UVIIVTHUKOR	нтопмания	викопистана	лия каптограмування	тепитопії уклаїни
140314491 2.	Cynyrinnobu	myopmann	Dincopriciana	Ann Kapioi pawy bannin	rephroph s spann

KA	1989 p.	1990 p.	2000 p.	2010 p.	Об'єм файлів, ГБ
«Landsat-4»	23	5	_	_	30.28
«Landsat-5»	_	89	3	145	259.97
«Landsat-7»	_	_	158	40	218.3

Кількість знімків	1990 p.			2000 p.	2010 p.		
	Площа, тис. га	Доля від загальної площі, %	Площа, тис. га	Доля від загальної площі, %	Площа, тис. га	Доля від загальної площі, %	
1	13953.86	23.11	670.75	1.11	1591.69	2.64	
2	9082.06	15.05	6232.47	10.32	9735	16.12	
3	11993.07	19.87	23959.82	39.69	16934.36	28.05	
4	14750.46	24.44	10012.41	16.59	13543.88	22.44	
5	7420.13	12.29	7272.59	12.05	6628.18	10.98	
6	3163.23	5.24	9051.59	15.00	5641.71	9.35	
7	_	_	3163.18	5.24	6287.99	10.42	
Всього	60362.81	100	60362.81	100	60362.81	100	

Таблиця 3. Покриття даними «Landsat» території України за досліджувані роки

теристики покриття території України знімками «Landsat» наведено у табл. 3. Кожний рядок таблиці містить інформацію про частку території України, покриту конкретною кількістю знімків за певний рік (площу в гектарах, покриту даною кількістю знімків, та її долю від загальної площі території України). У першій графі таблиці вказана максимально можлива кількість супутникових зображень, що перекривають зазначені частки території України у вказані роки.

ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ТА ТЕСТОВОЇ ВИБІРОК

Оскільки класифікація здійснювалась за ретроспективними даними, для побудови навчальної вибірки використовувався метод фотоінтерпретації. При цьому у процесі побудови навчальної



Миколаївської області

Таблиця 4	Векторні	дані
-----------	----------	------

K TOO	Кіл	ькість поліго	онів	Доля від загальної кількості, % Доля від загальної площі, 9					лощі, %
Клас	2010 p.	2000 p.	1990 p.	2010 p.	2000 p.	1990 p.	2010 p.	2000 p.	1990 p.
Штучні об'єкти Землі сільсько-	30	14	55	0.23	0.12	0.47	0.04	0.03	0.08
господарського призначення	6280	5952	5873	48.14	49.88	50.69	40.95	39.5	43.99
Ліс	2338	2336	2296	17.92	19.58	19.82	19.23	19.66	20.36
Луг	2480	2082	1813	19.01	17.45	15.65	9.86	8.12	7.60
Відкритий ґрунт	315	171	156	2.42	1.43	1.35	0.95	1.33	1.00
Вода	1602	1377	1392	12.28	11.54	12.02	28.97	31.36	26.97
Всього	13045	11932	11585	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

вибірки важливо забезпечити пропорційне представлення всіх класів земної поверхні по всій цільовій території [17].

До складу побудованих вибірок входять полігони для шести класів, що відповідають номенклатурі LUCAS [16]. Серед них: штучні об'єкти, землі сільськогосподарського призначення, ліс, луг, відкритий грунт та вода. У роботі [4] одним з класів земного покриву розглядаються болота та заболочені території, однак цей клас займає малу частку території Україні (1.8—2.2 %), тому в роботі не розглянутий.

Кількість полігонів для кожного з класів відповідає пропорціям відповідних площ за статистичними даними. У результаті формування полігонів отримано вибірку, що містить 13045 полігонів для 2010 р., 11932 — для 2000 р. та 11585 — для 1990 р. Детальну інформацію представлено у табл. 4.

Вибірка, побудована окремо для кожної області України, випадковим чином розбивалась на дві множини (рис. 2): навчальну (становить 50 % від загальної кількості полігонів) та тестову (інші 50 %). Дані з навчальної вибірки використовувалися для навчання нейронної мережі, а тестова вибірка — для перевірки узагальнюючої здатності нейронних мереж на незалежних даних [5].

Для виключення із розгляду населених пунктів використовується векторна маска, побудована для всієї території України шляхом оцифровування даних високого розрізнення, а саме актуальної станом на кінець 2014 р. мозаїки зображень території України найвищого просторового розрізнення, представленої сервісом «Планета Земля Google».

ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА ДАНИХ ТА МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ

Початкові зображення містять шість спектральних каналів та три канали з маскою хмар, тіней та контурів хмар. На основі маски хмарності відбираються зображення, що містять не більше ніж 50 % захмареної території. На наступному кроці відбувається відновлення захмарених пікселів на основі часового ряду (послідовність знімків, що покривають одну територію впродовж року) за допомогою карт Кохонена (self-organising map — SOM) [21]. Для класифікації використовується ансамбль нейронних мереж на основі багатошарових персептронів (MLP — multi-layer perceptron), в якому кількість прихованих нейронів підбирається в залежності від кількості каналів зображень, поданих на навчання. Для класів, мало представлених у вибірці, відбувається розмноження представників даного класу. У результаті навчання нейронних мереж відбувається на вибірках, в яких кількість пікселів кожного класу однакова.

Проведені експерименти показали, що використання ансамблю нейронних мереж підвищує точність класифікації в порівнянні з окремою нейронною мережею [9, 11, 12, 15, 20]. Кожна нейронна мережа після класифікації видає апостеріорну імовірність належності вхідного піксела до певного класу. В ансамблі ми рахуємо середню апостеріорну ймовірність виходів усіх мереж:

$$p_i^e = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^{L} p_l^{l'}, \qquad (1)$$

$$k^* = \arg\max_{k=1,K} p_k^e, \qquad (2)$$

де p_i^e — апостеріорна імовірність приналежності класу до ансамблю, p_i^l — апостеріорна імовірність приналежності класу до кожного класифікатора MLP, L — кількість класифікаторів в ансамблі нейронних мереж, K — кількість класів, k^* — клас, до якого належить вхідний піксел ансамбл нейронних мереж.

Відновлення захмарених даних та класифікація реалізовані за допомогою Matlab з використанням додаткових бібліотек: Netlab для проведення класифікації та SOM toolbox для відновлення захмарених пікселів. І хоча дані операції потребують значних комп'ютерних ресурсів, цей недолік в наші дні легко долається шляхом використання розподілених [13, 14] та високопродуктивних обчислень [19].

Після побудови тематичної карти застосовується такий метод фільтрування вибірки [18]. Автоматично знаходимо полігони із навчальної і тестової вибірки, клас яких визначено некоректно. Експерт аналізує помилкові результати класифікації полігонів у порядку спадання долі площі незбігу. Причиною невідповідності може бути нерівномірність розміщення класів по досліджуваній області або непропорційне їхнє представництво порівнянні з реальними площами, що покривають ці класи. Для детального аналізу результатів та визначення проблемних класів, які варто проаналізувати більш детально, використовуються матриці невідповідностей. Провівши фільтрацію і редагування вибірки, необхідно повторно виконати класифікацію та проаналізувати нові отримані результати на предмет точності та надійності отриманої вибірки.

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Традиційно для оцінки якості класифікації використовують незалежну тестову (валідаційну) вибірку. Спосіб формування тестової вибірки в задачі, що розглядається, детально описаний вище. Загальна кількість елементів тестової вибірки (полігонів) для 2010 р. становить 6431, для 2000 р. — 6053, для 1990 р. — 5406, причому в кожній області доля представників кожного класу у вибірці приблизно відповідає відсотку площі земного покриву, що припадає на даний клас. Попри те, що вибірка для кожної області розбивається перед класифікацією на дві множини однакової потужності, загальна кількість полігонів тестової вибірки менша від 50 %. Це пояснюється тим, що знімки перекриваються, і полігон, що був для однієї сцени тестовим, для іншої може бути навчальним. Тому для забезпечення незалежності тестових даних полігони, що використовувались для навчання хоча б один раз, із тестової вибірки виключаються. Якщо кількості полігонів певного класу у тестовій вибірці недостатньо для перевірки точності побудованої тематичної карти, експерт додає додаткові полігони у тестову вибірку на основі фотоінтерпретації зображень.

Приклад просторового розподілу елементів тестової вибірки для Миколаївської області наведено на рис. 2.

В загальному чисельну характеристику якості класифікації на тестовій вибірці наведено у табл. 5 [18].

Як видно із табл. 5, загальна точність класифікації складає 97.5 % — 2010 р., 97.7 % — 2000 р., 97.3 % — 1990 р., а по кожному із класів не є нижчою за 80 %. Найнижча точність класифікації спостерігається для лугів (grassland), оскільки цей клас важко відділити від оброблюваних сільськогосподарських земель.

Другий спосіб валідації результатів полягає у проведенні експедицій та зборі наземних даних про типи земного покриву. Однак за умови картографування ретроспективних даних такий підхід реалізувати неможливо.

Статистичні дані не можна вважати цілком узгодженими, проте це єдиний спосіб оцінити точність класифікації не лише на обмеженій, хоч і незалежній вибірці, а на всій території України. Наприклад, за офіційними статистичними даними [3] площа земель сільськогосподарського призначення в Черкаській області зросла май-

Клас	201	0 p.	2000 p. 1990			0 p.
	ТВ, %	TK, %	ТВ, %	TK, %	ТВ, %	TK, %
Штучні об'єкти	100	79.9	73.3	83.9	97.8	92.7
Землі сільськогоспо- дарського призначення	97.5	98.5	97.1	98.6	97.5	98.2
Ліс	97.2	97.4	98.8	98.4	96.7	98.5
Луг	90.7	85.4	90.5	84.6	90	82.5
Відкритий ґрунт	93.6	96.9	96.2	89.7	94.5	93.4
Вода	99.5	99.8	99.5	99.9	99.5	99.7
Загальна точність, %	97	7.5	97	.7	97	.3

Таблиця 5. Точність класифікації для території України (ТВ — точність «виробника», ТК — точність «користувача»)


Рис. 3. Карта класифікації території України за 2010 рік та карти класифікації Київської області за 1990, 2000 та 2010 роки

же на 40 % у 2000-му році (порівняно з 1990 р.) і зменшилась практично до попереднього рівня у 2010-му році.

Для переважної більшості областей України помилка класифікації відносно даних офіційної статистики, пронормована до площі області, для луків та посівних площ становить 5—15 % (виняток становить Житомирська обл. для луків; АР Крим, Одеська, Запорізька та Чернівецька обл. для посівних площ), помилка для лісів становить 5 % (за винятком Кіровоградської обл.).

Таким чином, можна стверджувати, що отримані карти класифікації земного покриву відзначаються досить високим рівнем точності для основних типів землекористування. Аналізуючи побудовані тематичні карти за декілька періодів часу, можна помітити певну закономірність. Зокрема, на рис. З для Київської області показано тенденцію зміни земного покриву. Значна частина земель, що були сільськогосподарськими землями у 1990 р., поступово перетворились в луги. Особливо це помітно в північнозахідній частині області. Семантичний аналіз отриманих результатів свідчить про істотне збільшення протягом 20 років незалежності України площі необроблюваних земель (grassland), особливо в північно-західній частині України. Розроблена технологія дозволяє будувати карти земного покриву для території України з потрібною періодичністю в автоматизованому режимі.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі запропонована методологія побудови ретроспективних карт земного покриву великих територій за супутниковими даними з просторовим розрізненням 30 м. Запропонована методологія передбачає використання нейромережевої класифікації часових рядів супутникових даних, на яких попередньо відновлено інформацію у захмарених областях, з подальшим об'єднанням отриманих карт для всієї території. Розроблену методологію застосовано для класифікації земного покриву території України за ретроспективними супутниковими даними. Використання інтелектуальних методів обробки часових рядів даних «Landsat» дозволило забезпечити загальну точність класифікації даних за 1990, 2000 та 2010 рр. на рівні 97 % (на незалежній вибірці) і значно покращити якість картографування порівняно з іншими картами земного покриву України з просторовим розрізненням 30 м, наприклад [8].

Основні результати роботи отримано в рамках проекту FP7 «Стимулювання інновацій для глобального моніторингу сільського господарства та його вплив на навколишнє середовище в підтримку GEOGLAM» (Sigma).

- *Геопортал* ESA CCI Land Cover products: a new generation of satellite-derived global land cover products. Електронний ресурс — режим доступу станом на 15.12.2014: http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php.
- 2. *Геопортал* Геологічної служби США (United States Geological Survey). Електронний ресурс режим доступу станом на 15.12.2014: http://earthexplorer.usgs. gov.
- Державна служба статистики України: Статистичний щорічник України за 2010 рік. — Київ: ТОВ «Август Трейд», 2011. — 560 с.
- 4. *Изменения* земных систем в Восточной Европе / Отв. ред. В. И. Лялько. Киев, 2010. 582 с.
- Скакун С. В., Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я. и др. Класифікація сільськогосподарських посівів з використанням часових рядів супутникових даних // Індуктивне моделювання складних систем. — 2014. — Вип. 6. — С. 157—166.
- Chander G., Markham B., Helder D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sens. Environ. – 2009. – 113. – P. 893–903.

- 7. *Chen J., Liao A., Cao X., et al.* Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens. 2015. 103. P. 7-27.
- Foody G. Status of land cover classification accuracy assessment // Remote Sens. Environ. 2002. 80, N 1. P. 185–201.
- Gallego J., Kussul N., Skakun S., et al. Efficiency assessment of using satellite data for crop area estimation in Ukraine // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinform. – 2014. – 29. – P. 22–30.
- Giria C., Pengrab B., Longc J., Lovelanda T. R. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinform. 2013. 25. P. 30–37.
- Kussul N., Skakun S., Shelestov A., et al. Crop clasification in Ukraine using satellite optical and SAR images // Models and Analyses. – 2013. – 2, N 2. – P. 118–128.
- Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M. Large scale crop classification in Ukraine using multi-temporal Landsat-8 images with missing data // American Geophysical Union Fall Meeting (AGU 2014), San Francisco, USA, December 15-19, 2014.
- Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid and sensor web technologies for environmental monitoring // Earth Sci. Inform. -2009. - 2, N (1-2). - P. 37-51.
- Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Technologies for satellite data processing and management within international disaster monitoring projects // Grid and Cloud Database Management Grid — Fiore, S.; Aloisio, G. (Eds.). — 2011, Springer — P. 279–306.
- Lavreniuk M., Kussul N., Skakun S. Integrated use of multi-temporal SAR and optical satellite imagery for crop mapping in Ukraine // American Geophysical Union Fall Meeting (AGU 2014), San Francisco, USA, December 15–19, 2014.
- 16. *Lucas* survey European statisticians monitor territory. Електронний ресурс — режим доступу станом на 15.12.2014: http://www.uni-mannheim.de/edz/pdf/ eurostat/03/KS-AZ-03-001-EN-N-EN.pdf
- Olofsson P., Foody G. M., Herold M., et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // Remote Sens. Environ. – 2014. – 148. – P. 42–57.
- Sánchez J. S., Barandela R., Marqués A. I. Analysis of new techniques to obtain quality training sets // Pattern Recognit Lett. – 2003. – 24, N 7. – P.1015–1022.
- Shelestov A., Kussul N., Skakun S. Grid technologies in monitoring systems based on satellite data // J. Automation and Inform. Sci. – 2006. – 38, N 3. – P. 69–80.
- Skakun S., Kussul N., Basarab R. Dealing with missing data in remote sensing images within land and crop classification // 40th COSPAR Scientific Assembly, (2–10 August 2014, in Moscow, Russia) – P. 3–14.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

- Skakun S., Kussul N., Basarab R. Restoration of missing data due to clouds on optical satellite imagery using neural networks // ESA SENTINEL-2 for Science Workshop, ESA-ESRIN, Frascati, Rome, Italy, 20-22 May 2014. Available at: http://seom.esa.int/S2forScience2014/ files/05_S2forScience-MethodsI_KUSSUL.pdf.
- Skakun S. V., Basarab R. M. Reconstruction of missing data in time-series of optical satellite images using selforganizing Kohonen Maps // J. Automation and Inform. Sci. – 2014. – 46, N 12. – P. 19–26.
- 23. *Warmerdam F*. The geospatial data abstraction library / Eds H. Brent, L. G. Michael // Open Source Approaches in Spatial Data Handling. Berlin: Springer, 2008. Vol. 2. P. 87—104.

Стаття надійшла до редакції 10.03.15

- Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун,
- Р. М. Басараб, Б. Я. Яйлимов, Н. С. Лавренюк,

А. В. Колотий, Д. Ю. Ящук

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

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ РЕГИОНАЛЬНАЯ КАРТА ЗЕМНОГО ПОКРОВА ДЛЯ УКРАИНЫ: МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе предложена методология построения ретроспективных карт земного покрова для территории Украины, которая основана на использовании интеллектуальных методов обработки спутниковых данных, а именно нейросетевой классификации временных рядов космических снимков спутников «Landsat-4», «Landsat-5», «Landsat-7». В результате её применения получены карты почвенно-растительного покрова для всей территории Украины за 1990, 2000 и 2010 гг. со средней точностью классификации 95 % (полученной на независимой тестовой выборке).

Ключевые слова: Д33, картографирование, классификация, нейронные сети, спутниковые снимки.

N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, R. Basarab, B. Yaylimov, M. Lavreniuk, A. Kolotii, D. Yashchuk

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

RETROSPECTIVE REGIONAL LEVEL LAND COVER MAP FOR UKRAINE: METHODOLOGY OF DEVELOPMENT AND RESULTS ANALYSIS

This paper presents the methodology of retrospective land cover mapping for Ukrainian territory. Proposed methodology is based on intelligent processing techniques of satellite data, namely neural network classification of time series of Landsat-4, Landsat-5, Landsat-7 imagery (with 30m spatial resolution). As the result of its implementation we've obtained land cover maps for all Ukrainian territory over 1990, 2000 and 2010 years with the average accuracy of 95 % (produced on independent test set).

Key words: Remote sensing, mapping, classification, neural networks, satellite imagery.

УДК 58.031:577.352.4:582.736.3

€. Л. Кордюм¹, О. М. Недуха¹, В. П. Грахов², А. К. Мельник¹, Т. В. Воробйова¹, О. М. Клименко¹, І. В. Жупанов¹

¹ Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, Київ ² Національний ботанічний сад ім. М. Гришка Національної академії наук України, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДЕЛЬОВАНОЇ МІКРОГРАВІТАЦІЇ НА БІЛІПІДНИЙ ШАР ЦИТОПЛАЗМАТИЧНОЇ МЕМБРАНИ РОСЛИННИХ КЛІТИН

Наведено результати досліджень мікров'язкості, вмісту ліпідів та жирних кислот у фракції цитоплазматичної мембрани, виділеної із епікотилів і коренів проростків гороху (Pisum sativum), які росли в умовах клиностатування 6 діб. За змінами у досліджуваних показниках встановлено гравічутливість цитоплазматичної мембрани, ступінь якої був вищий для мембрани коренів. Вперше виявлено значне підвищення стеринів у цитоплазматичній мембрані під впливом клиностатування. Розглядаються актуальні питання подальших досліджень гравічутливості/гравізалежності структури та функції цитоплазматичної мембрани рослинних клітин.

Ключові слова: клиностатування, мембрана, ліпідний бішар, стерини, Pisum sativum

ВСТУП

Дослідження впливу мікрогравітації на живі системи на клітинному та молекулярному рівні, а також на генетичну стабільність, ріст, розвиток, репродукцію, старіння, тривалість життя, орієнтацію тварин і рослин перебувають у центрі уваги сучасної космічної та гравітаційної біології — як ключ до рішення загальної біологічної проблеми — ролі гравітації у функціонуванні біосфери [9, 11]. Здатність рослин рости та розвиватися у космічному польоті дозволяє вирішувати фундаментальні проблеми космічної та гравітаційної біології, використовуючи унікальні умови мікрогравітації. Відкриття гравічутливості рослинних клітин належить до фундаментальних надбань сучасної біології, базується на змінах ме-

© Є. Л. КОРДЮМ, О. М. НЕДУХА, В. П. ГРАХОВ, А. К. МЕЛЬНИК, Т. В. ВОРОБЙОВА, О. М. КЛИМЕНКО, таболізму та структури клітин, спеціалізованих і не спеціалізованих до сприйняття гравітації, під впливом мікрогравітації. Тому нагальним завданням сьогодення є подальше з'ясування ступеня гравічутливості та гравізалежності клітинних структур і метаболічних процесів, що необхідно для пізнання механізмів адаптації рослин до дії цього чинника.

Біологічні мембрани, особливо цитоплазматична, та їхні властивості й функції можуть розглядатися як найбільш чутливі індикатори впливу гравітації або зміненої гравітації на клітину. Біліпідний шар цитоплазматичної мембрани слугує межею між внутрішнім вмістом клітини та зовнішнім середовищем і є посередником між ними. Різноманіття та мінливість ліпідного складу мембран також припускає їхню участь у регуляції найважливіших клітинних процесів. Незважаючи на ключову роль цитоплазматичної мембрани у функціонуванні клітини, літературні дані щодо впливу зміненої гравітації

I. В. ЖУПАНОВ, 2015

на її фізико-хімічні властивості дуже обмежені. Повідомлялося про зміни вмісту фосфоліпідів і жирних кислот і мікров'язкості цитоплазматичної мембрани, ізольованої із коренів проростків гороху під впливом клиностатування [2, 21]. Висунуто гіпотезу, що цитоплазматична мембрана є первинним сайтом дії мікрогравітації. Зміни у поверхневому натягу мембрани під впливом мікрогравітації можуть відігравати роль індуктора, вплив якого посилюється внаслідок гетерогенності мембрани по її довжині [10]. Експериментальним доказом припущення, що стан і проникність цитоплазматичної мембрани гравізалежні, стали досліди Ганке [8], який використав планарний ліпідний бішар з вбудованим у нього аламетицином для утворення пор і знайшов, що провідність бішару залежала від кута бішару до вектора гравітації. На думку автора, зміни проникності мембрани виникли не внаслідок впливу на провідність пор або на поверхню розділу мембранно-водного розчину, а скоріш є результатом взаємодії гравітації із механізмами, що формують пору. Пізніше застосування цієї моделі, а також реконструйованих поринів зовнішньої мембрани Escherichia coli дозволило виявити безпосередній вплив гравітації на іонні канали та мембрани, що, як припускається, може пояснити деякі біологічні ефекти гравітації [7]. За допомогою флуоресцентної поляризаційної мікроскопії із використанням багатоцільового 96-луночного планшета-ридера у параболічному польоті нещодавно було продемонстровано гравізалежність текучості (в'язкості) як штучних ліпідних мембран, так і клітинних [23]. Тому метою наших досліджень було з'ясувати ступінь чутливості ліпідного бішару цитоплазматичної мембрани рослинних клітин до дії модельованої мікрогравітації (клиностатування) за складом і вмістом ліпідів, жирних кислот і мікров'язкістю.

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як об'єкти досліджень було обрано проростки гороху (*Pisum sativum*) сорту Берсек, які росли у стаціонарних умовах і умовах клиностатування. Сухе насіння стерилізували протягом 20 хв у 1 % водному розчині КМпO₄, промивали проточною водою і викладали на мокрий фільтрувальний

папір на 20 годин. Насінини, які проклюнулися, загортали у трубочки із фільтрувального паперу, орієнтуючи зародковим коренем донизу. Трубочки із насінинами поміщали в контейнери, половину яких ставили на повільний горизонтальний клиностат (2 об/хв), другу залишали у стаціонарному контролі. Проростки росли у темноті при температурі 21 ± 2 °С протягом 6 діб.

Фракцію цитоплазматичної мембрани одержували методом двофазної водно-полімерної системи [13], оптимізованим саме для проростків гороху, із використанням центрифуги «Optima L-90K». У кожній біологічній повторності (всього 6) фракції мембрани одержували окремо із коренів і епікотелів 360—400 проростків. Чистоту фракції перевіряли за допомогою електронної мікроскопії після забарвлення везикул цитоплазматичної мембрани фосфорновольфрамовою кислотою [6] (рис. 1).

Для визначення складу ліпідів із препаратів цитоплазматичної мембрани ліпіди екстрагували ізопропанолом, потім матеріал обезводнювали безводним сульфатом натрію. Для отримання ліпідних профілів, що включають гліколіпіди, стерини, фосфоліпіди, тригліцериди тощо, застосовували 3-елюентну схему (елюент А — 0.01 М водний розчин ортофосфорної кислоти, елюент С — ацетонітрил, елюент D — ізопропанол) на



Рис. 1. Мікросомальна фракція з клітин коренів проростків гороху, збагачена везикулами цитоплазматичної мембрани, які складають 80...85 % фракції

колонці «Angilent Thermo Scientific HypersilTM BDS C₁₈», 3 мкм, 2.1×100 мм. Профіль елюювання проводили відповідно до заданої програми на рідинному хроматографі «Angilent 1100». Окремі класи ліпідів ідентифікували, використовуючи стандартні речовини та реагенти на окремі функціональні групи. Базове детектування проводилось при $\lambda = 206$ нм.

Аналіз жирних кислот проводили після лужного гідролізу мембранних фосфоліпідів у вигляді п-бромфенацилових похідних за допомогою обернено-фазової рідинної хроматографії на системі «Angilent 1100». Використовували 2-елюентну систему (елюент А - 0.05 М водний розчин ортофосфорної кислоти; елюент В — метанол) на колонці «Angilent ZORBAX Eslipse XDB-C18, 5 мкм, 4.6×250 мм». Базове детектування проводилося при $\lambda = 258$ нм, поріг виявлення жирних кислот перевищував 0.02-0.03 моль%, аналітична похибка менша за 2 %. Жирні кислоти ідентифікували, порівнюючи відносний час утримання піків із стандартами, а також за масою. Індекс ненасиченості визначали як відношення ненасичених / насичених жирних кислот.

Для оцінки мікров'язкості ліпідного бішару цитоплазматичної мембрани за допомогою ЕПР за спінові зонди використовувалися спінмічені аналоги стеаринової кислоти, у яких парамагнітний фрагмент перебуває у різних положеннях щодо карбоксильної групи: 5-доксилстеаринова кислота (5-DSA) і 16-доксилстеаринова кислота (16-DSA). Спектри ЕПР отримували на ЕПР-спектрометрі BRUKER ELEXSYS E580 FT/CW. Локалізацію активності Са²⁺- АТФази досліджували за методом Вакштейна — Мейселя у модифікації Н. В. Беліцер та ін. [3].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Встановлено, що фракції цитоплазматичної мембрани, виділені з епікотилів та коренів проростків гороху, які росли в стаціонарних умовах, відрізнялися за вмістом різних класів ліпідів, серед яких переважали фосфо- та гліколіпіди (табл. 1), та за вмістом окремих фосфоліпідів (табл. 2) і ненасичених і насичених жирних кислот (табл. 3). Індекс ненасиченості був вищим у фракції, виділеної з епікотилів, порівняно з таким фракції, виділеної із коренів: 1.7 та 1.3 відповідно.

Серед окремих фосфоліпідів в цитоплазматичній мембрані епікотилів найбільший вміст (від 10 % і більше) становили лізофосфатидилетаноламін, фосфатидилгліцерол та фосфатидилінозитол, тоді як у мембрані коренів — ізофосфатидилхолін, лізофосфатидилетаноламін, фосфатидилхолін, фосфатидилінозитол та фосфатидилсерін (табл. 2).

Виявлено, що у фракції цитоплазматичної мембрани із епікотилів і коренів переважали ненасичені жирні кислоти, доля яких становила 62.9 % в епікотелі та 56.0 % — у корені, доля насичених жирних кислот становила 37.1 та 43.5 % відповідно (табл. 3).

За показниками подвійного зв'язку доля ненасичених жирних кислот також відрізнялась у цитоплазматичній мембрані епікотилів і коренів (табл. 4), індекс подвійного зв'язку був вищим у цитоплазматичній мембрані епікотилів.

Таблиця 1. Вміст окремих класів ліпідів у фракціях цитоплазматичної мембрани,	
ізольованих із епікотилів та коренів проростків гороху, в контролі та при клиностатуванні	

	Вміст, %				
Клас ліпідів		Епікотиль	Корінь		
	контроль	клиностатування	контроль	клиностатування	
Фосфоліпіди	68.33	68.49	75.00	70.35	
Гліколіпіди	6.27	7.09	16.57	13.29	
Тригліцериди	9.51	13.01	4.47	3.59	
Стерини	5.89	11.40	3.94	12.76	

Виявлено чутливість до модельованої мікрогравітації досліджуваних показників біліпідного шару цитоплазматичної мембрани, що проявлялася у зниженні або збільшенні загального вмісту різних класів ліпідів (табл. 1), а також вмісту окремих фосфоліпідів (табл. 2) та жирних кислот (табл. 3, 4), причому ступінь чутливості був вищим для цитоплазматичної мембрани клітин коренів порівняно з такою цитоплазматичної мембрани клітин епікотиля. Вміст окре-

Таблиця 2. Вміст фосфоліпідів у фракціях цитоплазматичної мембрани,
ізольованих із епікотилів та коренів проростків гороху, в контролі та при клиностатуванні

	Вміст фосфоліпідів, %			
Фосфоліпід	Епікотиль		Корінь	
	контроль	клиностатування	контроль	клиностатування
Лізофосфатидилхолін	8.41	8.60	11.69	12.57
Лізофосфатидилетаноламін	12.28	11.62	20.00	25.26
Лізофосфатидилсерин	7.01	9.83	4.21	7.37
Фосфодитна кислота	9.84	10.05	7.01	6.58
Фосфотидилхолін	9.83	9.39	14.73	20.06
Фосфотидилдиметилетаноламін	7.97	8.22	2.8	2.39
Фосфатидилетаноламін	9.26	9.92	9.47	8.08
Фосфатидилгліцерол	10.38	10.70	7.72	10.48
Фосфатидилінозитол	10.84	13.31	12.98	11.07
Фосфатидилмонометилетаноламін	5.64	5.35	2.81	2.99
Фосфатидилсерин	7.50	8.22	12.99	11.97
Сфінгомієлін	1.04	1.04	1.40	1.19

Таблиця 3. Вміст жирних кислот у фракціях цитоплазматичної мембрани, ізольованих із епікотилів та коренів проростків гороху, в контролі та при клиностатуванні

	Вміст жирних кислот, %				
Жирна кислота	Еп	ікотиль	Корінь		
	контроль	клиностатування	контроль	клиностатування	
Міристоолеїнова 14:1	< 0.13	< 0.06	0.6	0.5	
Ліноленова 18:3	8.3	9.1	6.0	4.1	
Міристинова 14:0	0.6	0.7	1.2	1.2	
Пальмітоолеїнова 16:1	0.4	0.4	0.6	0.6	
Лінолева 18:2	49.3	47.5	40.8	37.8	
Дигомоліноленова 20:3	0.07	< 0.14	< 0.05	0.2	
Пальмітинова 16:0	29.8	30.7	34.3	36.2	
Олеїнова 18:1	3.4	2.6	6.8	11.5	
Дигомолінолева 20:2	0.4	0.5	0.2	0.2	
Дикозатриєнова 22:3	0.4	0.4	0.5	0.5	
Стеаринова 18:0	6.0	6.4	7.5	5.8	
Гадолеїнова 20:1	0.4	0.4	0.3	0.2	
Дикозодієнова 22:2	< 0.06	< 0.06	< 0.20	0.14	
Арахідонова 20:0	0.6	0.7	0.4	0.4	
Ерукова 22:1	0.10	< 0.10	< 0.15	0.2	
Бегенова 22:0	< 0.06	< 0.07	< 0.15	0.3	

Примітка. Жирним шрифтом позначено ненасичені жирні кислоти

	Вміст жирних кислот, %				
Жирні кислоти	Епіко	ЭТИЛЬ	Корінь		
	контроль	клиностатування	контроль	клиностатування	
Моноєнові	4.43	3.56	8.45	13.0	
Дієнові	49.76	48.06	41.2	38.14	
Триєнові	8.77	9.64	6.55	4.8	

Таблиця 4. Вміст моно-, ді- та триєнових ненасичених жирних кислот у фракціях цитоплазматичної мембрани, ізольованих із епікотилів та коренів проростків гороху, в контролі та при клиностатуванні

мих фосфоліпідів по-різному змінювався у цитоплазматичній мембрані епікотилів та коренів під впливом клиностатування, а саме: у перших помітно збільшувався вміст фосфатидилсерину, фосфатидилінозитолу та фосфатидилетаноламіну, у других — вміст лізофосфатидилетаноламіну, лізофосфатидилсерину, фосфатидилхоліну та фосфатидилгліцеролу (табл. 2). У фракціях цитоплазматичної мембрани із епікотилів та коренів в умовах клиностатування також переважали ненасичені жирні кислоти (62.2 % та 55.9 % відповідно). Відмічено збільшення моноєнових ненасичених жирних кислот в цитоплазматичній мембрані кореня. Оскільки відомо, що синтез поліненасичених жирних кислот здійснюється оксигеназами, зокрема ацил-десатуразами [15], що є чутливими до зміни умов навколишнього середовища [19], припускається вплив клиностатування на активність цих ферментів.

Індекс ненасиченості жирних кислот дорівнював такому в контролі і становив 1.6 для епікотиля та 1.3 для кореня, що, як припускається, обумовлюється новим балансом, який встановлюється між збільшенням або зменшенням ненасичених і насичених жирних кислот в умовах клиностатування та підтримує текучість (мікров'язкість) цитоплазматичної мембрани в стаціонарних межах. Припущення щодо подібності мікров'язкості цитоплазматичної мембрани в умовах клиностатування до контролю, зроблене на підставі даних, одержаних за допомогою рідинної хроматографії, підтверджуються результатами аналізу спектрів ЕПР спінових зондів, які мали схожий характер у мікросомальній фракції в контролі та умовах клиностатування (рис. 2).

Як відомо, підтримка властивих клітинним мембранам текучості на належному рівні має вирішальне значення для функціонування та цілісності клітини, зокрема для руху та функціонування вбудованих в них білків і ліпідів, транспорту білків та інших молекул через мембрану у процесі сигналінгу, клітинного ділення тощо. Фундаментальним біофізичним детермінантом текучості мембран є баланс між насиченими та ненасиченими жирними кислотами.

Вперше встановлено суттєве збільшення у цитоплазматичній мембрані вмісту стеринів: удвічі у мембрані епікотиля та майже у чотири рази у мембрані кореня порівняно з контролем (табл. 1, рис. 3) [1, 20].

Стерини, як відомо, разом з глікосфінголіпідами та фосфоліпідами, що містять переважно насичені жирні кислоти, входять до складу спеціалізованих доменів мембрани, які отримали назву «ліпідні рафти» [18], де ліпідний бішар знаходиться в щільному високоупорядкованому стані. Припускається, що рафти, які збагачені на холестерин і сфінголіпіди, модулюють білкові взаємодії і, таким чином, вливають на численні життєво важливі клітинні процеси [12]. Неодноразово сповіщалось про наявність таких функціональних доменів у цитоплазматичній мембрані рослинних клітин [4, 18]. Оскільки рафти також включають білкові комплекси, необхідні для сприйняття та передачі зовнішніх сигналів, захисту від стресів, патогенезу, везикулярного транспорту тощо, значне збільшення стеринів під впливом клиностатування може вказувати на зміни у проникності мембрани та активності відповідних білків [14]. Останнє припущення узгоджується з даними глобального аналізу білкового



Рис. 2. Спектри спінового зонда 5-DSA в мікросомальній фракції у контролі (а) та при клиностатуванні (б)

складу мікросомальної фракції, виділеної з клітин проростків Arabidopsis thaliana, що виросли в умовах космічного польоту. Під впливом мікрогравітації значно збільшувався вміст мембраннозв'язаних білків, задіяних у метаболізмі та захисті клітин, що, на думку авторів роботи [16], вказує на формування клітинами адаптивної відповіді. Останні дослідження генної експресії в умовах реальної та симульованої мікрогравітації також вказують на зміни ліпідного метаболізму під впливом цих чинників. Тому дослідження ліпідних рафтів у цитоплазматичній мембрані рослин в умовах реальної та симульованої мікрогравітації та гіпергравітації можуть дати нові оригінальні дані щодо функціонування цитоплазматичної мембрани при дії зміненої гравітації та гравічутливість/гравізалежність її структури та функції.

Слід відмітити, що підвищену стійкість мембран у більш пристосованих до несприятливих впливів рослин пов'язують, зокрема, із якісними та кількісними змінами у складі ліпідів, перш за все фосфоліпідів і жирних кислот. Локальні зміни ліпідного складу мембран під впливом різних чинників є одним із механізмів алостеричного контролю активності ферментів. Тому ми провели дослідження локалізації активності Са²⁺- АТФази в клітинах дистальної зони головного кореня 6-добових проростків гороху в контролі та в умовах клиностатування, оскільки цей фермент відіграє найістотнішу роль у підтримці Са²⁺-гомеостазу у клітині [5]. Активність цього



Рис. 3. Вміст стеринів у фракціях цитоплазматичної мембрани, ізольованих із епікотилів і коренів проростків гороху, в контролі (*1*) та в умовах клиностатування (*2*)

ферменту регулюється різними кислими фосфоліпідами, що оточують білок у цитоплазматичній мембрані [17]. Проведені дослідження показали, що продукт реакції в клітинах дистальної зони розтягання кореня локалізувався в основному на цитоплазматичній мембрані, рідше спостерігався на мембранах ендоплазматичного ретикулуму та диктіосом, оболонок мітохондрій та лейкопластів. В умовах клиностатування, навпаки, відбувалося послаблення цитохімічної реакції на цитоплазматичній мембрані та її посилення на ендомембранах. Зниження активності кальцієвої помпи на цитоплазматичній мембрані може бути однією з причин збільшення концентрації іонів кальцію в цитозолі в умовах клиностатування, що потребує подальших досліджень. Доцільно також майбутнє вивчення активності фосфоліпази С в умовах клиностатування як маркерного ферменту змін ліпідного бішару цитоплазматичної мембрани, оскільки зміни гідрофобності його поверхні відіграють ключову роль у регуляції фосфоліпази С [22]. Як відомо, цей фермент має важливе значення у передачі сигналів від багатьох рецепторів завдяки здатності гідролізувати фосфатидилінозитолфосфат у діацилгліцерол та інозитолтрифосфат, перший активує протеїнкіназу С, другий веде до виходу внутрішньоклітинного кальцію.

Кількісні відмінності у вмісті ліпідів і жирних кислот у цитоплазматичній мембрані епікотилів і коренів у контролі та при клиностатуванні скоріш за все пов'язані із особливостями в структурі, типах клітин, рості та специфічних функціях кореня та епікотиля, які у кореня є набагато складнішими. Епікотиль 6-добових проростків гороху містить тільки клітини, які ростуть і диференціюються, головний корінь — клітини меристеми, зони розтягу та диференціювання, статоцити кореневого чохлика є високо спеціалізованими клітинами для сприйняття гравітації, а клітини зони розтягу — для реалізації гравітропічної реакції. Тому цитоплазматична мембрана клітин кореня та епікотиля має відрізнятися за станом та функціями, що і може пояснювати збільшення її чутливості до клиностатування саме в корені. На підставі одержаних даних пропонується проводити подальші дослідження впливу мікрогравітації на цитоплазматичну мембрану клітин кореня.

- 1. *Недуха О. М., Грахов В. П., Воробйова Т. В. и др.* Ефекти горизонтального клиностатування на вміст ліпідів плазмалеми гороху // Матер. 14-ї Укр. конф. з космічних досліджень. Ужгород, 2014. С. 56.
- Полулях Ю. А. Содержание фосфолипидов и жирных кислот в плазматической мембране клеток корней гороха при клиностатировании // Докл. АН УССР. Сер. Биол. — 1988. — № 10. — С. 67—69.
- Belitser N. V., Zaalishvili G., Sytnniankaja N. Ca²⁺-binding sites and Ca²⁺-ATPase activity in barley root tip cells // Protoplasma. – 1982. – 111. – P. 63–78.

- 4. *Borner G. H. H., Sherrier B. O., Weimar T., et al.* Analysis of detergent-resistant membranes in *Arabidopsis.* Evidence for plasma membrane lipid rafts // Plant Physiol. 2005. **137**. P. 104—116.
- 5. *Cabala K., Klobus G.* Plant Ca²⁺⁻ATPases // Physiol. Plantarum. 2005. **27**. P. 559–574.
- Carde J.-P. Electron microscopy of plant cell membranes // Methods Enzymol / Eds L. Packer, R. Douce. – USA: Acad. Press Inc., 1987. – 148. – P. 599–622.
- Goldermann M., Hanke W. Ion channel are sensitive to gravity changes // Microgravity Sci. Technol. – 2001. – 13. – P. 35–38.
- 8. *Hanke W*. Planar lipids bilayers as model systems to study the interaction of gravity with biological membranes // 30th COSPAR Scientific Assembly. Hamburg, Germany. P. 283.
- Kittang A.-I., Iversen T.-H., Fossum K. R., et al. Exploration of plant growth and development using the European Modular Cultivation System facility on the International Space Station // J. Plant Biology. — doi:10. 1111/plb. 12132.
- Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // Int. Rev. Cytol. – 1997. – 171. – P. 1–78.
- Kordyum E. L. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity // J. Plant Biology. – 2014. – 16, N 1. – P. 79–90.
- Kraft M. L. Plasma membrane organization and function: moving past lipid rafts // Mol. Biol. Cell. – 2013. – 24. – P. 2765–2768.
- Larsson Ch., Sommarin M., Widell S. Isolated of highly purified plant plasma membranes and separation of insideout and right-side-out vesicles // Methods in Enzymology. – 1994. – 228. – P. 451–469.
- Lingwood D., Simons K. Lipid rafts as a membrane-organizing principle // Science. – 2010. – 327. – P. 46– 50.
- Los D. A., Murata N. Structure and expression of fatty acid desaturases // Biochim. et biophys. acta. — 1998. — 1394. — P. 3—15.
- Mazars C., Brière C., Grat S., et al. Microgravity induces changes in microsome-associated proteins of *Arabidopsis* geedlings grown on board the International Space Station // PLOS. – 2014. – 9. – P. 1–18.
- Monesterolo N. E, Amaiden M. R., Campetelli A. N., et al. Regulation of plasma membrane Ca²⁺-ATPase activity by acetylated tubulin: Influence of the lipid environment // Biochim. et biophys. acta — Biomembranes. — 2012. — 1818. — P. 601—608.
- Mongrand S., Morel J., Laroche J., et al. Lipid rafts in higher plant cells: purification and characterization of Triton X-100-insoluble microdomains from tobacco plasma membrane // J. Biol. Chem. – 2004. – 279. – P. 36277–36286.

- Murakami Y., Tsuyama M., Kobayashi Y., et al. Trienoic fatty acids and plant tolerance of high temperature // Science. – 2000. – 287. – P. 476–479.
- Nedukha O. M., Kordyum E. L., Grakhov V. P., et al. Fatty acids and lipids content in *Pisum sativum* seedlings plasmalemma under clinorotation // Proc. Plant Biology and Biotechnology International Conf. — Almaty, Kazakhstan, 2014. — P. 176.
- Polulyakh Yu. A., Zhadko S. I., Klimchuk D. A. Plant cell plasma membrane structure and properties under clinostating // Adv. Space Res. — 1989. — 9. — P. 71— 74.
- Rupwate S. D., Rajasekharan R. Plant phosphoinositide-specific phospholipase C // Plant Signal. Behav. – 2012. – 7. – P. 1281–1283.
- Sieber M., Hanke W., Kohn F. P. M. Modification of membrane fluidity by gravity // Open J. Biophysics. – 2014. – 4. – P. 105–111.

Стаття надійшла до редакції 05.01.15

Э. Л. Кордюм¹, Е. М. Недуха¹, В. П. Грахов²,

А. К. Мельник³, Т. В. Воробйова¹, Е. Н. Клименко¹, И. В. Жупанов¹

¹Институт ботаники им. М. Г. Холодного Национальной академии наук Украины, Киев

²Национальный ботанический сад им. Н. Н. Гришко Национальной академии наук Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СИМУЛИРОВАННОЙ МИКРОГРАВИТАЦИИ НА ЛИПИДНЫЙ БИСЛОЙ ЦИТОПЛАЗМАТИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ КЛЕТОК

Представлены результаты исследований микровязкости, состава липидов и жирных кислот во фракции цитоплазматической мембраны, выделенной из эпикотилей и корней проростков *Pisum sativum*, растущих 6 суток на клиностате. Полученные данные об изменениях липидного бислоя показали гравичувствительность цитоплазматической мембраны, которая была выше у мембраны, изолированной из корней. Впервые выявлено увеличенное содержание стеринов в цитоплазматической мембране в условиях клиностатирования. Рассматриваются первоочередные вопросы дальнейших исследований гравичувствительности/гравизависимости цитоплазматической мембраны растений.

Ключевые слова: клиностатирование, мембрана, липидный бислой, стерины, *Pisum sativum*

T. L. Kordyum¹, O. M. Nedukha¹, V. P. Grakhov¹, A. K. Mel'nik¹, T. M. Vorobyova¹, O. M. Klimenko¹, I. V. Zhupanov¹

¹M. G. Kholodny Institute of Botany of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

²M. M. Gryshko National Botanic Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

STUDY OF THE INFLUENCE OF SIMULATED MICROGRAVITY ON THE CYTOPLASMIC MEMBRANE LIPID BILAYER OF PLANT CELLS

Results of the investigations of microviscosity, the composition of lipids and fatty acids in the fraction of the cytoplasmic membrane isolated from epicotyls and roots of *Pisum sativum* seedlings grown during 6 days under clinorotation are presented. Based on the changes in the investigated patterns, gravisensitivity of the cytoplasmic membrane was established, and a degree of gravisensitivity was higher in the root's membrane. An increased content of sterols in the cytoplasmic membrane under clinorotation was shown for the first time. Urgent questions on further research of gravisensitivity/gravidependence of the plant cell cytoplasmic membrane are discussed.

Key words: clinorotation, membrane, lipid bilayer, sterols, *Pisum sativum*

УДК 576:611.71/72

Н. В. Родионова, Е. В. Катькова, О. Н. Нестеренко, Е. В. Скрипченко

Институт зоологии им. И. И. Шмальгаузена Национальной академии наук Украины, Киев

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КЛЕТКАХ КОСТНОЙ ТКАНИ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

Изучаются клеточные механизмы гравитационно-зависимых изменений в длинных костях скелета животных, побывавших в условиях космического полета на международном биоспутнике «Бион-М1» и в наземных модельных экспериментах. С учетом полученных данных об ультраструктурных реакциях клеток костной ткани предложена концепция о механизмах механотрансдукции и потери костной массы при снижении (снятии) гравитационной нагрузки.

Ключевые слова: клетки костной ткани, невесомость, длинные кости, электронная микроскопия.

введение

Исследования, проведенные на космических биоспутниках и станциях в России (ГНЦ РФ ИМБП РАН), США (научно-исследовательские центры NASA), странах Европейского Союза, показали, что костный скелет является важной мишенью действия невесомости на организм. Установлено, что в этих условиях уменьшается масса, прочность и минеральная насыщенность скелета, особенно в костях, которые несут опорную нагрузку (длинные кости конечностей, позвонки, кости таза), развиваются остеопения, иногда остеопороз [1-3, 7, 9]. Однако до настоящего времени остаются во многом не выясненными клеточные механизмы, которые обеспечивают структурную и функциональную адаптацию и дезадаптацию костного скелета к изменениям стато-динамических нагрузок.

Практическую значимость проблема приобретает не только в связи с необходимостью нахождения человека в условиях космического полета (невесомость), а также с дефицитом опорно-двигательных нагрузок (гипокинезия) у жителей развитых стран, что приводит к появлению «болезни цивилизации» — остеопороза. По данным ВОЗ каждый год увеличивается заболеваемость и смертность населения в результате остеопоротических переломов, особенно у пожилых людей.

Цель наших исследований — получение новых данных о клеточных механизмах гравитационно-зависимых изменений в костях скелета в условиях невесомости. В настоящей работе основное внимание уделено изучению и анализу гистоструктурных изменений и ультраструктурных реакций остеогенних клеток (остеобластов, остеоцитов, остеокластов) в зонах адаптивных и деструктивных перестроек в костях конечностей животных, пребывавших в условиях реальной («Бион-М1») и моделированной невесомости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на мышах (линия С 57 black, самцы), пребывавших на биоспутнике «Бион-М1», продолжительность полета 30 сут (с 19 апреля по 19 мая 2013 г.) в рамках международного эксперимента со специалистами России ГНЦ РФ ИМБП РАН.

[©] Н. В. РОДИОНОВА, Е. В. КАТЬКОВА, О. Н. НЕСТЕРЕНКО, Е. В. СКРИПЧЕНКО, 2015

После полета и прибытия в ИМБП РАН мыши (5 полетных и 8 контрольных из наземного синхронного эксперимента) были подвергнуты наркозу согласно требованиям этических норм. Биообразцы костной ткани из берцовых и плечевых костей фиксировали в 2.5 % растворе глютаральдегида на фосфатном буфере, pH – 7.4 и транспортированы в Киев, где проводилась их дальнейшая обработка для гистологических, гистохимических и электронно-микроскопических исследований (заключение в парафин и эпоксидные смолы, изготовление гисто- и ультратонких срезов).

МОДЕЛИРОВАННАЯ НЕВЕСОМОСТЬ

Нами был поставлен наземный эксперимент на животных (белые крысы, самцы, 4-мес. возраста) с моделированием микрогравитации (снятие опорной нагрузки с задних конечностей на протяжении 21 сут путем подвешивания за хвост под углом 35° по методу [9]). Животных перед забоем наркотизировали эфиром согласно требованиям этических норм. Биообразцы берцовых костей фиксировали в 6 %-м формальдегиде и 2.5 %-м глютаральдегиде для гистологических и электронно-микроскопических исследований соответственно. Гистопрепараты окрашивали гематоксилином Майера-эозином, гематоксилином Майера-тионин-эозином, исследовали в световом микроскопе «Цейс». Ультратонкие срезы контрастировали ацетатом свинца и изучали в электронном микроскопе «Тесла БС-500».

Анализ полученных гистопрепаратов и электронных микрофотографий проводили с использованием компьютерной программы «Biovizard». Подсчитаны следующие показатели: относительный удельный объем костной ткани в метафизах и диафизах (на условную единицу площади среза), удельный объем щелей и полостей, количество остеобластов и остеоцитов, в том числе с признаками апоптоза, пустых остеоцитарных лакун, а также остеокластов (на единицу площади гистосреза) др. Результаты исследований обработаны статистически с использованием программы Microsoft Excel 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что условия невесомости («Бион-М1») влияют на структуру берцовых костей мышей. Имеют место нарушения архитектоники и частичная деструкция костных трабекул в метафизах, участки расслоения и полости в кортикальной кости диафизов (рис. 1). Относительный удельный объем трабекул достоверно снижается, удельный объем полостей возрастает, в условиях моделированной гипокинезии аналогичные изменения в берцовых костях крыс выражены меньше (таблица).

Указанные выше перестройки свидетельствуют об утрате костной массы в исследованных костях.

Известно, что процессы остеогенеза и адаптивного ремоделирования в костях скелета происходят в тесной топографической взаимосвязи с кровеносными капиллярами и сопровождаю-

Показатели	Полетная группа (м $\pm \chi_{_{M}}$)	Контрольная группа (м $\pm \chi_{_{M}}$)
Относительный удельный объем в метафизах		-
Мыши	0.193 ± 0.010	0.231 ± 0.011
Крысы	0.238 ± 0.011	0.263 ± 0.013
Относительный удельный объем полостей в диафизе		
Мыши	0.042 ± 0.002	0.027 ± 0.001
Крысы	0.047 ± 0.002	0.029 ± 0.001
Количество остеокластов	4.13 ± 0.20	2.84 ± 0.14
Количество пустых остеоцитарных лакун	4.21 ± 0.21	2.57 ± 0.12
Количество функционально-активных остеокластов	8.14 ± 0.40	12.72 ± 0.63

Морфометрические показатели изменений в костных структурах берцовых костей мышей при невесомости («Бион-М1») и крыс (моделированная гипокинезия) на условную единицу площади гистосреза

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3



Рис. 1. Расслоение костных пластинок и остеопоротические полости в диафизе берцовой кости мыши («Бион-М1», ширина микрофотографии 205 мкм)



Рис. 2. Деминерализация и зоны фиброза в диафизе берцовой кости мыши («Бион-М1», ширина электронной микрофотографии 1.66 мкм)

щими их периваскулярными клетками. По сравнению с контрольными, у опытных животных отмечено расширение костных сосудистых каналов и усиление васкуляризации кортикальной кости, что отражает процесс ее деструктуризации и может рассматриваться как реакция на невесомость. В костных каналах регистрируются клетки моноцитарного ряда, формирующие остеокласты — клетки, которые резорбируют минерализованный костный матрикс по ходу вростания сосудов. Количество остеокластов в таких зонах у опытных животных увеличивается (таблица). Проведенные ранее исследования особенностей ультраструктуры и метаболизма 45 Са²⁺ в остеокластах в условиях снятия опорной нагрузки с задних конечностей и микрогравитации показали активизацию остеокластической резорбции минерализованного костного матрикса [11].

Кровеносные сосуды сопровождаются также малодифференцированными клетками фибробластического типа. Радиоавтографическими исследованиями с 3Н-тимидином (предшественником синтеза ДНК) и применением маркеров остеогенной дифференцировки показано, что в зонах остеогенеза и ремоделирования идет последовательная дифференцировка периваскулярно расположенных клеток в остеогенные [4]. В экспериментах на крысах с моделированием и применением 3Н-тимидина установлено снижение интенсивности пролиферации остеогенных клеток-предшественников, замедление их дифференцировки в остеобласты и процессов их трансформации в остеоциты [5].

Исследования, проведенные нами в модельных экспериментах со снятием опорной нагрузки с задних конечностей крыс и применением электронной микроскопии и цитохимических маркеров остеогенной дифференцировки, показали, что в зонах ремоделирования и деструктивных перестроек костных структур происходит уменьшение количества дифференцирующихся остеогенных клеток-предшественников и возрастание количества фибробластов, т. е. условия снятия опорной нагрузки замедляют (или частично блокируют) остеогенную дифференцировку части периваскулярных клеток и стимулируют дифференцировку фибробластов, что приводит к появлению зон фиброза, участков, заполненных коллагеновыми фибриллами, которые не минерализуются. На костных поверхностях появляются адипоциты. Такую реакцию можно рассматривать как один из механизмов замедления интенсивности остеогенетических процессов в костях и снижения их прочности. Это отмечено и в эксперименте на «Бион-М1»: вблизи кровеносных сосудов в кортикальной кости мышей появляются характерные зоны деминерализации и фиброза. Это подтверждают и проведенные нами электронно-микроскопические исследования (рис. 2).

В костной ткани метафизов и диафизов берцовых костей мышей («Бион-М1»), а также в берцовых костях крыс (моделированная невесомость) в популяции остеобластов в зонах остеогенеза уменьшается количество функционально-активных форм (имеют низкое ядерно-цитоплазматическое отношение), продуцирующих органический костный матрикс, то есть остеобластов 2-го и 3-го типа согласно предложенной нами квалификации функционального состояния остеобластов [4]. В популяции остеобластов увеличивается количество апоптозных клеток, особенно это характерно для остеобластов костной ткани берцовых костей мышей («Бион-М1»).

По данным электронной микроскопии в ядрах функционально-активных остеобластов усиливается гетерохроматинизация, матрикс митохондрий становится електронно-плотным, цитоплазматическая мембрана теряет четкость контуров, снижается удельный объем гранулярной эндоплазматической сети (ГЭС) и комплекса Гольджи, органелл, которые принимают участие в процессах биосинтеза органических компонентов костного матрикса, коллагеновых белков и гликозаминогликанов. Специфическим для невесомости является состояние ГЭС: узкие короткие каналы ГЭС без расширений распределяются по всей цитоплазме и не имеют типичной для остеобластов в контроле пространственной организации (рис. 3). Следует полагать, что нарушение типичной архитектоники органелл является следствием дезорганизации (или «разборки») аппарата микротрубочек, а также деструктивных процессов в мембранах. В условиях моделированной невесомости эти явления выражены в меньшей степени.

Полученные нами данные свидетельствуют, что снятие гравитационной нагрузки приводит к снижению остеопоэтических функций остеоб-



Рис. 3. Остеобласты: Я — ядро, ГЕС — гранулярная эндоплазматическая сеть, М — митохондрия, КМ — костный матрикс («Бион-11», 10 дней, ширина электронной микрофотографии 3.6 мкм)

ластов. Это подтверждено и в модельных экспериментах на крысах с использованием 3H-глицина [6].

В зонах костных перестроек имеет место трансформация остеобластов в выстилающие эндост клетки (bone-line cells). Электронно-микроскопическое исследование популяции остеобластов в костной ткани мышей, пребывавших в условиях невесомости («Бион-М1») позволило виявить такую метаболическую функцию остеобластов (характерную для остеоцитов), как участие в остеолитических процессах при адаптивном ремоделирования костной ткани.

При трансформации в выстилающие эндост клетки в остеобластах происходит утилизация части ГЕС путем аутофагоцитоза (в клетках увеличивается удельный объем аутофаголизосом), возрастает также удельный объем структур ком-



Рис. 4. Выстилающая остеогенная клетка (фрагмент), усиление остеолитических процессов, направленнях на деминерализацию костной ткани («Бион-М1», ширина электронной микрофотографии 7.6 мкм)

плекса Гольджи, особенно везикулярного компонента — лизосом (0.156 \pm 0.006, опыт; 0.124 \pm \pm 0.005, контроль, *P* < 0.005). Содержащие остеолитические ферменты лизосомы поступают на прилежащую костную поверхность, где осуществляют остеолизис минерализованного костного матрикса (рис. 4).

В популяции зрелых остеоцитов в диафизах берцовой кости мышей увеличивается количество апоптозных клеток и пустых остеоцитарных лакун (таблица), на основе которых формируются костные полости и развивается «порозность». Возрастает площадь остеоцитарных лакун, в которых находятся функционирующие остеоциты, что свидетельствует об усилении их остеолитической функции — ферментативном растворении окружающего остеоциты минерализованного матрикса. Такая реакция остеоцитов подтверждена при анализе их ультраструктуры — в клетках достоверно возрастает удельный объем структур комплекса Гольджи и лизосомных структур (0.140 \pm 0.007, опыт; 0.119 \pm 0.005, P < 0.05). Усиление процессов остеолизиса в остеоцитах подвздошной кости было отмечено нами в эксперименте на обезьянах на «Бион-11» [13]. Остеолитические процессы направлены на деминерализацию и деструкцию костной ткани и приводят к развитию «порозности» в костях.

Полученные результаты вносят новое в разработанную нами концепцию о механизмах механотрансдукции и потери костной массы при снижении (снятии) гравитационной нагрузки [6, 12]. В зонах перестроек костных структур имеет место следующая последовательность клеточных взаимодействий:

• первичной является реакция остеоцитов (рассматриваются как механосенсорные клетки [8, 10], что выражается, как показано нами [6, 13], в усилении процессов остеоцитарного остеолизиса;

• передача механических сигналов через систему костных каналов и контактирующих отростков остеобластам и выстилающим эндост клеткам, а также клеткам костномозговой стромы;

• замедление в системе стромальные клетки — остеогенные клетки-предшественники остеобласты процессов пролиферации и дифференцировки, снижение остеопоэтических функций остеобластов;

• трансформация остеобластов в выстилающие эндост клетки, в которых усиливаются процессы остеолизиса костного матрикса.

При длительном отсутствии гравитационной нагрузки на костный скелет физиологически адекватного восстановления процессов остеогенеза в костной ткани не происходит (или масштабы его снижаются), в локусах ремоделирования может развиваться фиброзная ткань, которая не минерализуется, а также появляются адипоциты.

Эта последовательность клеточных реакций может рассматриваться как один из механизмов потери костной массы, что лежат в основе развития остеопении и остеопороза при дефиците гравитационной нагрузки.

Авторы благодарны коллегам из ГНЦ РФ ИМБП РАН Б. С. Шенкману, Л. Б. Буравковой, В. С. Оганову, О. Е. Кабицкой за возможность научного сотрудничества в эксперименте на «Бион-М1».

Работа выполнена в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг., проект «Клеточные механизмы гравитационно зависимых процессов в костях скелета в условиях микрогравитации».

- 1. Григорьев А. И., Воложин А. И., Ступаков Г. П. Минеральный обмен у человека в условиях измененной гравитации. — М.: Наука, 1994. — Т. 74. — 216 с.
- 2. *Оганов В. С.* Костная система, невесомость и остеопороз. Изд. 2-е, перераб. и доп. — Воронеж: Науч. книга, 2014. — 291 с.
- 3. Оганов В. С., Григорьев А. И. О механизмах остеопении и особенностях метаболизма костной ткани человека в условиях невесомости // Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. — 2012. — 98, № 3. — С. 395— 409.
- 4. *Родионова Н. В.* Функциональная морфология клеток в остеогенезе. — Киев: Наук. думка, 1989. — 186 с.
- 5. *Родионова Н. В.* Динамика пролиферации и дифференцировки остеогенных клеток при снятии опорной нагрузки // Цитология и генетика. 2011. **45**, № 2. С. 22—27.
- Родіонова Н. В. Цитологічні механізми перебудов у кістках при гіпокінезії та мікрогравітації. — Київ: Наук. думка, 2006. — 238 с.
- Doty S. B. Space flight and bone formation // Materwiss Werksttech. – 2004. – 35, N 12. – S. 951–961.
- Klein-Nulend J. Bacabac R. G. Veldhuyzen J. P., et al. Microgravity and bone cell mechanosensitivity // Adv. Space Res. - 2003. - 32, N 8. - P. 1551-1559.
- Morey-Holton E. R., Globus R. K. Hindlimb unloading of growing rats: A model for predicting skeletal changes during space flight // Bone. – 1998. – 22, N 5. – P. 79–82.
- 10. *Noble B. S., Reeve J.* Osteocyte function, osteocyte death and bone structure resistance // Mol. and Cell. Endocrinol. - 2000. - **159**, N 1-2. - P. 7-13.
- Rodionova N. V., Oganov V. S. Peculiarity of ultrastucture and ⁴⁵Ca methabolism of osteoclasts in condictions of hind limb unloading and microgravity // Vestnik zoology. – 2009. – 43, N 4. – P. 305–313.
- 12. Rodionova N. V., Oganov V. S., Kabitskaya O. Conception on the cell mechanisms of bone tissue loss under space

flight conditions // 40th COSPAR Scientific Assembly. — 2014. — F5.2-7-14 (electron publ.).

 Rodionova N. V., Oganov V. S., Zolotova N. V. Ultrastructural changes in osteocytes in microgravity conditions // Adv. Space Res. – 2002. – 30, N 4. – P. 765–770.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Н. В. Родіонова, О. В. Катькова, О. М. Нестеренко, О. В. Скрипченко

Інститут зоології ім. І. І. Шмальгаузена Національної академії наук України, Київ

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗМІНИ У КЛІТИНАХ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ В УМОВАХ КОСМІЧНОГО ПОЛЬОТУ

Вивчаються клітинні механізми гравітаційно-залежних змін у довгих кістках скелета тварин, що перебували в умовах космічного польоту на міжнародному біосупутнику «Біон-М1» і у наземних модельних експериментах. З урахуванням отриманих даних про ультраструктурні реакції клітин кісткової тканини запропоновано концепцію механізмів механотрансдукції та втрати кісткової маси при зменшенні (усуненні) гравітаційного навантаження.

Ключові слова: клітини кісткової тканини, невагомість, довгі кістки, електронна мікроскопія.

N. V. Rodionova, O. V. Katkova, O. N. Nesterenko, O. V. Skripchenko

I. I. Schmalhausen Institute of Zoology of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL CHANGES IN THE CELLS OF THE BONE TISSUE IN SPACE FLIGHT

The article is devoted to studying of the cellular mechanisms of gravitational-dependent changes in the long bones of the animals' skeleton during the space flight on the international biosatellite «Bion-M1» and in land model experiments. Taking into account the obtained new data about ultrastructural reactions of bone tissue cells, the concept about mechanisms of the mechanotransduction and bone mass loss at lowering (removal) gravitational loading is offered.

Key words: cells of bone tissue, weightlessness, long bones, electron microscopy.

UDC 579.65

I. Zaets¹, O. Podolich¹, O. Kukharenko¹, I. Orlovska¹, A. Haidak¹, S. Shpylova¹, L. Khirunenko², I. Rogutskyy², O. Reva³, E. Rabbow⁴, J.-P. P. de Vera⁵, R. Demets⁶, N. Kozyrovska¹

¹Institute of Molecular Biology & Genetics of NASU, Kyiv, Ukraine, kozyrna@ukr.net

² Institute of Physics of NASU, Kyiv, Ukraine

³ Pretoria University, Bioinformatics Center, South Africa

⁴German Aerospace Center (DLR) Cologne, Institute of Aerospace Medicine, Radiation Biology, FRG,

⁵German Aerospace Center (DLR) Berlin, Institute of Planetary Research, FRG

⁶ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

PRE-FLIGHT KOMBUCHA SAMPLES TESTING BEFORE EXPOSITION OUTBOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

Kombucha is a multispecies microbial community which produce bacterial cellulose — a polymer molecule to be a candidate for a biomarker of life. For the pre-flight ground-based phase of Biology and Mars Experiment (BIOMEX), the multi-microbial cellulose-based biofilm was embedded in mineral material to test the structural integrity of the bacterial cellulose and a survival of community-members under Mars-like CO_2 -rich atmosphere, pressure and solar irradiation spectrum similar to that on the surface of Mars. During the preparatory testing stage it was found that after the synergistic action of a set of stressful space- and Mars-associated factors the mineralized cellulose preserved the characteristic molecular fingerprints, which might be detected instrumentally. The flight stage of the BIOMEX begun on July, 2014 and will last for 12—18 months on the EXPOSE-R2 platform mounted by the astronauts outside the ISS.

Key words: astrobiology, Biology and Mars Experiment (BIOMEX), biosignature, bacterial cellulose.

THE INTERNATIONAL AND INTERDISCIPLINARY "BIOLOGICAL AND MARS EXPERIMENT (BIOMEX)" ON LOW EARTH ORBIT (LEO)

Interest to the Red Planet existed since ancient times. In modern times since the sixties of the last century, in the former SU, Sergey Korolyev elaborated a program of manned flights to Mars. Simultaneously, NASA's Mars Exploration Program was initiated and implemented. At present time, two American landers are exploring the Martian surface. The European ExoMars program will deliver a European rover in the next coming years. All missions in the Mars exploration programs aim to find signs of primitive life on Mars. However, questions remain, are there or were there Earth-like life forms on this planet; could terrestrial organisms survive under harsh Martian conditions. This means that future Mars missions have to be designed much more for a systemic investigation of its habitability and to search for life.

The international and interdisciplinary project BIOMEX headed by the DLR (Berlin) and realized by the European Space Agency (ESA) proposed another, relatively cheaper approach compared to several other projects to investigate the probability of life existence on Mars [1]. The idea is to simulate Martian conditions in LEO where, by using filters, solar irradiation similar to the Martian spectrum can be

[©] I. ZAETS, O. PODOLICH, O. KUKHARENKO, I. ORLOVSKA, A. HAIDAK, S. SHPYLOVA, L. KHIRUNENKO, I. ROGUTSKYY, O. REVA, E. RABBOW, J.-P. P. DE VERA, R. DEMETS,

N KOZVDOVSKA 2015

N. KOZYROVSKA, 2015

simulated, which might have significant impact on a variety of extremophiles (bacteria, archaea, algae, fungi, lichens and mosses), and to test their vitality, as well as the structural integrity of biomolecules as possible biosignatures. The samples were integrated on the EXPOSE-R2 platform at the outer side of the ISS.

The best chance to find signs of the present or past life on Mars is to investigate and model possible changes of biomolecules and the potential of organisms or bio-communities to form fossil remnants [3, 5]. In the framework of BIOMEX, we use a mineralized cellulose-based biofilm, where multi-component pro- and eukaryotic microbial assemblage may reside protected from the harsh conditions. In this work, we suggest to use as a model assemblage the complex kombucha microbial culture (KMC), where diagenetically changed bacterial cellulose may serve as a biosignature. A scheme of the Ukrainian segment of BIOMEX is shown on Figure.

Kombucha beverage has been used for millennia as a healthy and restorative drink. Now it may serve us beyond Earth as a promising model to study synbiotics (combined probiotic and prebiotic products) for space crew [2] and also nanocellulose as a multipurpose nanomaterial, which could be used also for construction of space-related devices, *e.g.*, supercapacitors [4]. An additional objective of our miniproject within BIOMEX was to study the cellulose stability to be used as a nanomaterial under extreme conditions.

The project BIOMEX began in the late 2010, and within a 3.5 year period it passed the way from an idea into a real experiment in space. Collection of samples and a field /laboratory study of pro- and eukaryotic objects for BIOMEX have been done by 25 institutions. A series of pre-flight experiments, using the Planetary and Space Simulation facilities (PSI) at the Institute of Aerospace Medicine (DLR, Cologne) (http://www.dlr.de/spacesim), showed the potential of model organisms to survive in a 1.0-1.5year space experiment on the EXPOSE-R2 platform. In the final stage of BIOMEX, the KMC cellulosebased pellicle was prepared as a bio-mineral sample for the exposure experiment at the ISS, and it was used in pre-flight assessments along with other model objects aforementioned.

BIO-MINERAL SAMPLES, TESTS FACILITIES AND EXPOSURE CONDITIONS

Bio-mineral samples comprised tiny 'pills' made from the KMC biofilm fragments (d = 7 mm) enclosed inside of the mineral-organic capsule, one of components of which was a grinded anorthosite rock from Ukrainian deposit (Zhytomyr oblast, Turchynka).

Two ground-based pre-flight Experiment Verification Tests (EVT) and two Science Verification Tests (SVT) were performed and realized at the PSI (DLR, Cologne), which aimed at modelling the space-flight conditions on EXPOSE-R2 platform outside the ISS and partially the conditions on Mars. Exposure of bio-mineral samples was performed to achieve two main objectives: to investigate the effects of spaceflight factors like vacuum, temperature fluctuations, short wavelength UV irradiations >200 nm, Martian atmosphere factors like gas composition and low pressure of 10³ Pa (EVTs), and to integrate fluencies of the 1-year experiment at the ISS (SVTs).

For the SVT run 2, a fully functional and a flightidentical ground hardware was provided. Samples were glued such as it is foreseen to be realized for the flight and integrated under sterile conditions into the appropriate 3-ground sample carriers at their positions. Four kombucha mineralized biofilm specimens in either carrier in the top, medium and bottom positions were located in the tray 2 along with other bio-mineral samples prepared by partners from the institutions affiliated to BIOMEX and objects from other projects.

A META-ANALYSIS OF BIO-MINERAL SAMPLES AFTER CUMULATIVE EFFECTS OF SIMULATED STRESSFUL FACTORS

In the final SVT, KMC specimens were studied after a period of 5 months since their preparation and the beginning of the experiment to determine the rates of survival of the KMC members. It was found that survival of the organisms depended on sample location in the experimental tray. Specimens from the middle and bottom carriers, which were shielded from UV-irradiation by the top layer, survived under Mars atmosphere and pressure simulated conditions and extreme temperature fluctuations, except for two KMC-members (one bacteria and one yeast species), which did not withstand the conditions.



A scheme of the path of the kombucha microbial community from laboratory to space. Photo credit: ESA/Roskosmos.

The specimens from the top carrier were completely sterilized by the UV-radiation applied in addition to the other harsh conditions. Alteration in species diversity of KMC samples from the middle and bottom layers in comparison to the laboratory (untreated) control was confirmed by a DNA technique that allows to analyze microbial polymorphic DNA segments (RAPD/PCR).

Remarkably, the bacteria which were located during the experiment in bottom and medium carriers kept the ability to create biofilms, however, with a little delay after recovering of the community, if compared to the laboratory and transport control samples. The FT-IR absorption spectra of the BCbased matrices produced by KMC after its recovery in the post-treatment period have not changed. BC from bio-mineral samples preserved spectral characteristics (*e. g.*, 960 – 730 cm⁻¹ fingerprint region of anomeric carbons, wherein a band at 897 cm⁻¹ confirmed the presence of specific β -1,4-linkages). After the treatments, KMC was able to mobilize and accumulate more actively inorganic ions from the anorthosite mineral carrier, if compared to the control. This was confirmed by confocal scanning laser microscopy and EDX-ray microanalysis data.

CONCLUSION AND FUTURE PERSPECTIVES

For the pre-flight ground-based experiments, the multi-microbial cellulose-based biofilm was embedded in mineral material to test the survival of community-members and integrity of the bacterial cellulose under Mars-like CO_2 -rich atmosphere, pressure and solar irradiation spectrum similar to that of the surface of Mars. During the preparatory testing stage it was found that after the synergistic action of a set of stressful space- and Mars-associated factors the mineralized cellulose preserved the characteristic molecular fingerprints, which might be detected instrumentally. These results demonstrated the stability of the cellulose and its applicability as a biomarker.

The final stage of the BIOMEX begun at the ISS in July 25, six hours after the launch. It will continue for 12-18 months on the EXPOSE-R2 platform mounted by the astronauts outside the ISS on August 18, 2014. The post-flight studies will include several previously worked out microbiological, molecular genetic and physical methods, which were severely tested in advance to achieve the basic scientific information on the impact of space-flight and simulated Martian factors on the KMC members and cellulose structural integrity.

The further space-related research on KMC will focus on the following aspects.

1. Kombucha-related live products as functional food or supplements for crew and animals. Being a synbiotic, KMC combines valuable metabolites, immunestimulatory nucleic acids and other compounds produced by micro-organisms, with crude cellulose fibres, fuelling human gut microbiota and providing biological calcium and other valuable minerals important for the crew. 2. *KMC as a component of the regenerative life-support systems,* performing *in situ* biomobilization of essential elements from local resources; functioning as a biosorbent; providing biological additives for animals and fertilizers for plants, a promising low cost and easy handling terraforming agent. Also it may contribute to crew positive relaxation and socialization as a joyful microbial 'pet'.

3. Bacterial cellulose is a biotechnologically attractive environmentally friendly multipurpose nanomaterial for space research applicable for construction of space-related electronic devices such as supercapacitors, power suppler facilities, etc.

The Ukrainian mini-project within the frames of BI-OMEX was supported by National Academy of Sciences of Ukraine (grant 47/2012-15). We are thankful to the astronauts and ESA for the logistic support of launch and integration of the samples on the ISS.

- 1. *de Vera J.-P., Boettger U., de la Torre Noetzel R., et al.* Supporting Mars exploration: BIOMEX in Low Earth Orbit and further astrobiological studies on the Moon using Raman and PanCam technology // Planet. Space Sci. 2012. **74**, N 1. P. 103–110.
- Kozyrovska N., Reva O., Goginyan V., de Vera J.-P. Kombucha microbiome as a probiotic: a view from the perspective of post-genomics and synthetic ecology // Biopolym. Cell. – 2012. – 28, N 2. – P. 103–110.
- 3. *Kukharenko O., Podolich O., Rybitska A., et al.* Robust symbiotic microbial communities in space research // Space research in Ukraine (2010–2011): The report to the COSPAR / Ed. by O. P. Fedorov. Kyiv: Academperiody-ka, 2012. P. 102–105.
- Li S., Huang D., Zhang B., et al. Flexible supercapacitors based on bacterial cellulose paper electrodes // Adv. Energy Mater. — 2014. — DOI: 10.1002/aenm.201301655.
- Zaets I., Podolich O., Kukharenko O., et al. Bacterial cellulose may provide the microbial-life biosignature in the rock records // Adv. Space Res. 2014. 53, N 5. P. 828-835.

Received 11.12.14

I. Засць¹, О. Подоліч¹, О. Кухаренко¹, І. Орловська¹, А. Гайдак¹, С. Шпильова¹, Л. Хіруненко², І. Рогуцький², О. Рева³, Е. Реббоу⁴, Ж.-П. П. де Вера⁵, Р. Демец⁶, Н. Козировська¹

¹ Інститут молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, Київ
² Інститут фізики Національної академії наук України, Київ

³ Центр біоінформатики Університету Преторії, Південна Африка

⁴ Інститут аерокосмічної медицини та радіаційної біології Кельнської філії Німецького космічного агентства, ФРН

⁵ Інститут планетарних досліджень Берлінської філії Німецького космічного агентства, ФРН

⁶ Європейський центр космічних досліджень і технологій Європейського космічного агентства,

Нордвік, Нідерланди

ПЕРЕДПОЛІТНІ ТЕСТУВАННЯ ЗРАЗКІВ КОМБУЧІ ПЕРЕД ЕКСПОНУВАННЯМ ЗА БОРТОМ МІЖНАРОДНОЇ КОСМІЧНОЇ СТАНЦІЇ

Чайний гриб є багатовидовим угрупованням мікроорганізмів, яке виробляє бактеріальну целюлозу — полімер, що є кандидатом у біомаркери живого. Для наземної фази експерименту ВІОМЕХ (біологічний марсіанський експеримент) мультимікробну целюлозну плівку було закладено у мінеральний матеріал, щоб перевірити структурну цілісність бактеріальної целюлози та виживання членів угрупування в імітованих умовах Марса (атмосфера, збагачена СО₂, тиск і спектр сонячного випромінювання, подібні до марсіанських). У ході підготовчого етапу встановлено, що після синергічної дії комплексу космічних і марсіанських факторів мінералізована целюлоза зберегла характерні молекулярні фінгерпринти, які може бути виявлено інструментально. Політний етап ВІОМЕХ розпочався у липні 2014 р. і триватиме протягом 12-18 місяців на платформі EXPOSE-R2, встановленій астронавтами зовні МКС.

Ключові слова: астробіологія, Biology and Mars Experiment (BIOMEX), біомаркер, бактерійна целюлоза.

И. Заец¹, О. Подолич¹, О. Кухаренко¹, И. Орловская¹, А. Гайдак¹, С. Шпилевая¹, Л. Хируненко², И. Рогутский², О. Рева³, Е. Реббоу⁴, Ж.-П. П. де Вера⁵, Р. Демец⁶, Н. Козыровская¹

¹ Институт молекулярной биологии и генетики Национальной академии наук Украины, Киев ² Институт физики Национальной академии наук Украины, Киев

³ Центр биоинформатики Университета Претории, Южная Африка

⁴ Институт аерокосмической медицины и радиационой биологии Кельнского филиала Немецкого космического агентства, ФРН

⁵ Институт планетарных исследований Берлинского филиала Немецкого космического агентства, ФРН ⁶ Европейский центр космических исследований и технологий Европейского космического агентства, Нордвик, Нидерланды

ДОПОЛЕТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ КОМБУЧИ НАКАНУНЕ ЭКСПОЗИЦИИ ЗА БОРТОМ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Чайный гриб является многовидовым сообществом микроорганизмов, которое производит бактериальную целлюлозу — полимер, являющийся кандидатом в биомаркеры живого. Для наземной фазы эксперимента BIOMEX (биологический марсианский эксперимент) мультимикробная целлюлозная пленка была заложена в минеральный материал, чтобы проверить структурную целостность бактериальной целлюлозы и выживание членов сообщества в имитированных условиях Марса (атмосфера, обогащенная СО,, давление и спектр солнечного излучения, подобные марсианским). В ходе подготовительного этапа установлено, что после синергичного действия комплекса космических и марсианских факторов минерализованная целлюлоза сохранила характерные молекулярные фингерпринты, которые могут быть обнаружены инструментально. Полетный этап BIOMEX начался в июле 2014 г. и продлится в течение 12-18 месяцев на платформе EXPOSE-R2, установленной астронавтами снаружи МКС.

Ключевые слова: астробиология, Biology and Mars Experiment (BIOMEX), биомаркер, бактериальная целлюлоза.

УДК 53.09+53.043+537.3+541.64

Ю. О. Клименко¹, Є. П. Мамуня², В. В. Левченко², О. В. Семенів¹, Ю. В.Пруцко¹, В. О. Яценко¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

та Державного космічного агентства України, Київ

² Інститут хімії високомолекулярних сполук Національної академії наук України, Київ

НОВІ НАНОКОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОСМІЧНИХ ДАВАЧІВ

Проведено серію лабораторних досліджень впливу зовнішніх механічних зусиль на деформацію і електроопір пружних електропровідних нанокомпозитів, які містять різноманітні вуглецеві та металічні домішки. Розроблено та створено пружний накомпозитний матеріал, який характеризується стійким електричним та деформаційним вігуком на дію зовнішніх механічних зусиль. Деформаційні та струмові характеристики матеріалу демонструють практично лінійну залежність від зовнішньої сили. Розглянуто перспективи використання одержаних нанокомпозитів у ролі активних елементів перспективних космічних сенсорів.

Ключові слова: нанокомпозит, деформація, електроопір, активний елемент.

вступ

На думку фахівців, найближчим часом близько 20 % космічних завдань будуть вирішуватися за допомогою надлегких мікросупутників та їхніх угруповань. Сучасні технології по суті обмежують можливості виробництва малогабаритних, відмовостійких та високонадійних мікросупутникових вузлів, елементів та систем. Необхідно шукати нові підходи, зокрема з використанням передових технологій приладобудування та матеріалознавства.

Літературні джерела [1—6] вказують на перспективність використання пружних електропровідних нанокомпозитів у ролі активних елементів різноманітних електромеханічних сенсорів, зокрема систем космічного базування. Подібні

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

композити являють собою полімерний матеріал, який містить в собі електропровідні частинки різного походження — вуглецеві нанотрубки та волокна, графіт, сажу, нано- або мікрокластери металів тощо. При концентрації частинок, яка є дещо вищою, ніж порог перколяції матеріалу, в об'ємі ізолюючої полімерної матриці утворюється провідна фаза. Якщо полімерна матриця має високі пружні характеристики, то невеликі по величині зусилля призводять до деформації матеріалу і, разом з ним, до зміни числа контактів між дисперсними частинками. Це відображається в суттєвій зміні електропровідності композиту під дією зовнішніх зусиль, яка може досягати 5-7 порядків.

Подібні електромеханічні явища відкривають широкі можливості для створення надчутливих електромеханічних давачів. Зокрема, для акселерометрів, де зміна об'єму нанокомпозитного матеріалу буде виникати за рахунок зовнішніх

[©] Ю. О. КЛИМЕНКО, Є. П. МАМУНЯ, В. В. ЛЕВЧЕНКО, О. В. СЕМЕНІВ, Ю. В.ПРУЦКО, В. О. ЯЦЕНКО, 2015



Зміни деформації є і струму I крізь зразок при циклічних навантаженнях F: a - для композиції Si-7%Ni+7%C, необробленої у магнітному полі, $\delta - для$ тієї ж композиції після обробки в магнітному полі, s - для композиції Si-11%Ni(micro)+7% Ni(nano) після обробки у магнітному полі

інерційних сил, а ступінь такої деформації буде реєструватись прямим вимірюванням електричного струму, який проходить через нанокомпозитний матеріал.

Нанокомпозитний матеріал для електромеханічних сенсорів, з одного боку, повинен забезпечувати високі пружні властивості для реалізації високої чутливості матеріалу. З другого боку, повинна спостерігатись стійка відновлювальність пружних та електричних характеристик у багатьох циклах навантаження/розвантаження композиту. Тому полімерний матеріал повинен мати високу адгезію до наповнювача з тим, щоб провідна фаза відновлювалася при навантаженні/ розвантаженні матеріалу та релаксувала разом з полімерною матрицею.

Незважаючи на те, що ідея створення сенсорів деформації на основі перколяційних переходів

у нанокомпозитах є досить прозорою, подібні пристрої досі не створені. Це сталося через те, що такі матеріали не мають стабільного і надійного електричного відгуку в широкому діапазоні деформаційних навантажень завдяки поступовому руйнуванню структури електропровідних каналів поблизу точки перколяції [4]. А оскільки сам перколяційний перехід складним (і навіть непередбачуваним) чином залежить від типу полімерної матриці, форми, розмірів і концентрації частинок наповнювача, від зв'язків між ними та їхньою взаємодією з полімерною матрицею, то створення високочутливого і неруйнівного сенсорного матеріалу є досить важким технологічним завданням.

Ми розробили нові засоби синтезу пружної полімерної матриці, яка має високу адгезію щодо вуглецевих та металевих включень. Знайдено склад електропровідного композиту на основі силікону і металевих наповнювачів, орієнтованих у магнітному полі. Одержаний матеріал характеризується великим електричним відкликом на дію зовнішніх механічних зусиль. У порівнянні з іншими відомими технологіями використання магнітного поля під час отвердження матеріалу дає змогу зформувати стійку 1D орієнтовану структуру провідної фази композиту. Завдяки цьому суттєво зменшується нестабільність електричного струму при збільшенні кількості циклів навантаження/розвантаження композитного матеріалу.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для проведення експерименту на базі Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України була зроблена модернізація установки термомеханічного аналізу ТМА Q400EM виробництва «ТА Instruments», США. Це надало можливість одночасної реєстрації механічних та електричних характеристик досліджуваних зразків.

За допомогою переобладнаної установки було проведено дослідження впливу механічних зусиль на деформаційні властивості та зміну електроопору нанокомпозитів на основі натурального каучуку або силікону з наповнювачами типу вуглецевих нанотрубок, вуглецевих волокон, мікро- та нанокластерів металів тощо. Наповнювачі вводилися в рідку силіконову смолу, змішувалися, потім додавався твердник, і композиція затверджувалася.

В ході експериментів досліджувалась кореляція між механічним напруженням матеріалу та спричиненими ним деформацією та електричним струмом. Вимірювання проводилися в режимі стиснення зразка циклічним методом. У першій половині циклу навантаження лінійно збільшувалось зі швидкістю 0.1 Н/хв, у другій — лінійно зменшувалось з такою ж швидкістю. Надалі цикли повторювалися.

Найбільш цікаві залежності струму від механічних зусиль для різних нанокомпозитів наведені на рисунку. Верхні графіки рисунків демонструють вигляд циклічного зовнішнього навантаження *F* на матеріал в залежності від часу.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3

Середній ряд графіків показує зміни відносної деформації є матеріалу. Нижні рисунки демонструють залежність електричного струму *I* від часу.

Фрагмент *а* відповідає структурам з хаотичним розподілом вуглецевих наповнювачів (композит Si-7%Ni+7%C). Як видно, цикли струму є нестабільними, а з ростом числа циклів загальний струм, що протікає через зразок, повільно знижується. Така ж ситуація виявляється типовою для всіх невпорядкованих нанокомпозитів.

Для впорядкування розподілу наповнювачів у полімерній матриці незатверджену композицію ми переносили у магнітне поле між двома полюсами магнітів. Тут відбувалося поступове тверднення композиту і одночасне формування одновимірної анізотропної структури, яка фіксувалася в затвердженому полімері.

В ході експериментів зі впорядкованими матеріалами напрямок навантаження збігався з напрямком орієнтування одновимірної структури у зразку. Поведінка того ж композиту, що і на фрагменті *a*, після обробки в магнітному полі показана на фрагменті *б*. Видно, що цикли струму стають більш стабільними.

Фрагмент e ілюструє оптимальну комбінацію наповнювачів — композит Si-11%Ni-(micro)+7% Ni(nano) (тут Si — силікон, С вуглецевий наповнювач, Ni(micro) — нікель з розміром частинок 10 мкм, Ni(nano) — нікель з розміром частинок 50 нм), яка практично повністю нагадує поведінку кривих зовнішнього навантаження. Крім того, спостерігається майже лінійна залежність деформації та струму на кожному з півциклів. Експеримент тривав упродовж тижня та не виявив суттєвої різниці між струмовими кривими початкових і заключних циклів.

висновки

Розроблено засоби формування структури полімерного композиту з металевими включеннями, який демонструє найбільш прийнятні характеристики електричного відгуку під час циклів навантаження/розвантаження цього нанокомпозитного матеріалу. У порівнянні з іншими відомими технологіями це дає змогу сформувати одновимірну орієнтовану структуру провідної фази композиту, що практично повністю ліквідує проблему нестабільності електричного сигналу зі збільшенням числа циклів навантаження/розвантаження матеріалу.

Розроблений композитний матеріал демонструє практично лінійну залежність електричного струму від зовнішньої сили. Реєструвати силу можна прямим вимірюванням електричного струму крізь електропровідний матеріал. Результати дослідження показують, що даний матеріал є перспективним для його використання у ролі чутливого елемента деформаційно-чутливих сенсорів космічного призначення — акселерометрів, гравіметрів, давачів диференційного тиску тощо. Концепцію побудови пристроїв з використанням електропровідних нанокомпозитів буде обгрунтовано на наступних етапах виконання проекту.

- 1. *Alamusi N. Hu, Fukunaga H., Atobe S., et al.* Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites // Sensors. 2011. **11**. P. 10691—10723.
- Flandin L., Brechet Y., Cavaille J.-Y. Electrically conductive polymer nanocomposiyes as deformation sensors // Compos. Sci. Technol. – 2001. – 61. – P. 895–901.
- Grillard F., Jaillet C., Zakri C., et al. Conductivity and percolation of nanotube based polymer composites in extensional deformations // Polymer. – 2012. – 53. – P. 183– 187.
- Jeong K.-U., Lim J. Y., Lee J.-Y., et al. Polymer nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes for semiconducting layers of high-voltage power cables // Polym. Int. – 2010. – 59. – P. 100–106.
- Park J.-M., Kim S.-J., Yoon D.-J., et al. Self-sensing and interfacial evaluation of Ni nanowire/polymer composites using electro-micromechanical technique // Compos. Sci. Technol. – 2007. – 67. – P. 2121–2134.
- Robert C., Feller J.-F., Castro M. Sensing skin for strain monitoring made of PC-CNT conductive polymer nanocomposite sprayed layer by layer // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2012. – 4. – P. 3508–3516.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Ю. А. Клименко¹, Е. П. Мамуня², В. В. Левченко², О. В. Семенив¹, Ю. В. Пруцко¹, В. А. Яценко¹

¹Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев ²Институт химии высокомолекулярных соединений Национальной академии наук Украины, Киев

НОВЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Проведена серия лабораторных исследований влияния внешних механических усилий на деформацию и электросопротивление упругих электропроводящих нанокомпозитов, содержащих различные углеродные и металлические примеси. Разработан и создан упругий нанокомпозитный материал, который характеризуется устойчивым электрическим и деформационным откликом на действие внешних механических усилий. Деформационные и токовые характеристики материала демонстрируют практически линейную зависимость от внешней силы. Рассмотрены перспективы использования полученных нанокомпозитов в качестве активных элементов перспективных космических сенсоров.

Ключевые слова: нанокомпозит, деформация, електросопротивление, активный елемент.

Yu. A. Klymenko¹, Ye. P. Mamunya², V. V. Levchenko², O. V. Semeniv¹, Yu. V. Prutsko¹, V. A. Yatsenko¹

¹Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv ²The Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

NEW NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR ELECTROMECHANICAL SPACE SENSORS

A series of laboratory experiments on the influence of external mechanical efforts to elastic deformation and electrical conductive in nanocomposites containing different carbon and metallic impurities has been made. The nanocomposite elastic material, which is characterized by stabile electric and deformation responses on external mechanical efforts has been designed and created. Deformation and current characteristics of the material exhibit an almost linear dependence on external forces. The prospects of using the obtained nanocomposites as active elements prospective space sensors have been considered.

Key words: nanocomposite, deformation, electric resistance, active element.

УДК 548.2, 658.512.2

Е. Л. Живолуб¹, В. Н. Лариончик², Б. И. Перепеченко³, О. П. Федоров^{1,4}

¹ Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова Национальной академии наук Украины, Киев ² ЗАО «НПП «Техсис», Киев

³Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины, Киев

⁴ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА МОРФОС-В — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ МОДЕЛЬНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СУКЦИНОНИТРИЛА

Приведены данные расчетов и экспериментальных исследований условий стационарности при направленной кристаллизации, а также результаты проектирования и макетирования отдельных узлов, блоков и вибросистемы установки МОРФОС-В.

Ключевые слова: фазовая граница, фронт кристаллизации, сукцинонитрил, математическое моделирование, линейная теория устойчивости, нестационарность, вибрационное воздействие, узел низкочастотной вибрации

введение

Целью проведения комического эксперимента МОРФОС-В является разработка научных основ управления микросегрегационной структурой кристаллических материалов в космосе на основе применения методов направленной кристаллизации и наложения низкочастотной вибрации, получения прямых экспериментальных данных о закономерностях эволюции фронта кристаллизации прозрачных систем при различных параметрах выращивания и вибрационного воздействия в условиях микрогравитации.

Создаваемая экспериментальная полетная установка МОРФОС-В, позволяет проводить непрерывную видеорегистрацию фазовой границы в процессе выращивания кристалла в цилиндрическом образце (метод Бриджмена). Исходя из целей исследования и программы экспериментов, предполагается получить результаты в следующих областях:

• устойчивость фазовой границы;

• влияние вибрации на эволюцию фронта кристаллизации;

• взаимодействие фронта кристаллизации с включениями другой фазы.

Области дальнейшего практического применения полученных научных результатов:

 апробация технологических условий получения на орбите монокристаллов различных веществ и сплавов с улучшенной структурой и свойствами;

• основы технологии получения искусственных композитов в условиях микрогравитации;

• технология литейного производства (уменьшение ликвации в слитках с дендритной структурой).

[©] Е. Л. ЖИВОЛУБ, В. Н. ЛАРИОНЧИК, Б. И. ПЕРЕПЕЧЕНКО, О. П. ФЕДОРОВ, 2015

Ниже приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований, а также технологических работ по созданию установки МОРФОС-В за 2014 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ КРИСТАЛЛ — РАСПЛАВ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ

В настоящей работе проблема стационарности продвижения фронта исследуется на основе сопоставления экспериментальных данных с численным моделированием. Для получения надежных результатов принципиально важно отделить возможные аппаратные эффекты (непостоянство скорости протяжки образца, колебания температуры в рабочей камере) от собственно нестационарных процессов на фазовой границе. Единого достоверного метода такого рода исследований, очевидно, нет. В настоящей работе применяются два взаимно дополняющих метода. Прямые наблюдения за фазовой границей в прозрачном веществе позволяют непосредственно фиксировать фронт кристаллизации в строго контролируемых условиях. Параллельно проводился вычислительный эксперимент: получены решения нестационарной тепловой и диффузионной задачи при условиях, соответствующих эксперименту.



Рис. 1. Зависимость величины смещения устойчиво выращенного кристалла от скорости перемещения образца и градиента температуры на фронте кристаллизации (сплошная линия 1 — расчет для v = 0.621 мкм/с)

Наши наблюдения, а также расчеты показывают, что при типичных параметрах выращивания прозрачного сплава на основе сукцинонитрила стационарное состояние не достигается. Опыты со всеми исследовавшимися препаратами показывают, что фронт кристаллизации непрерывно смещается относительно изотермы, причем это смещение зависит от скорости выращивания. Расчеты показали, что причиной такой нестационарности не могут быть тепловые эффекты. Эта особенность тепловых процессов обусловлена тем, что в исследуемом диапазоне скоростей перемещения образца величина теплового критерия Пекле оказывается существенно меньше единицы.

Динамика продвижения фронта может быть описана следующим образом. При формировании кристалла в жидкой фазе вблизи фронта кристаллизации за счет сегрегации примеси образуется обогащенный диффузионный слой, размеры и состав которого изменяются во времени. Диффузионной характеристикой, ответственной за устойчивость плоского фронта в нестационарных условиях, является градиент ∂C концентрации примеси в жидкой фазе $\partial x |_{x=\xi(t)}$ на фронте кристаллизации. По мере роста кристалла градиент концентрации в расплаве монотонно возрастает, пока при определенном размере выращенного кристалла не достигает такого значения, при котором плоский фронт теряет устойчивость.

Пусть $T^{(0)}_{kr} = T^* + \alpha_L C_0$ — начальная температура кристаллизации, $T_{kr}(t)$ — текущая температура кристаллизации, соответствующая концентрации $C_{kr}(t)$ кристаллизации жидкой фазы на фронте фазового перехода в момент времени tОбозначим через $\zeta(t)$ координату фронта кристаллизации с температурой $T_{kr}(t)$, а через $\eta(t)$ координату изотермы $T^{(0)}_{kr}$. Поскольку $T_{kr}(t) < < T^{(0)}_{kr}$, то $v_{kr} < v$ и, соответственно, $\eta(t) < \zeta(t)$, т. е. фронт кристаллизации «отстает» от изотермы $T^{(0)}_{kr}$. Величина смещения $l(t) = \eta(t) - \zeta(t)$ экспериментально определяется с высокой точностью и может выступать в качестве контролируемой характеристики нестационарного процесса кристаллизации. На рис. 1 приведены экспериментальные и расчетные данные о величине смещения *l*, достигнутого к моменту потери устойчивости для различных скоростей v перемещения образца. Чем меньше v, тем большими оказываются величина смещения и протяженность устойчиво выращенного кристалла.

Результаты теоретической оценки величины смещения вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, и тем лучше, чем меньше v. Увеличение величины смещения при малых v свидетельствует о том, что разность температур ликвидус в начале и конце устойчивого роста кристалла возрастает при уменьшении скорости перемещения образца.

Сопоставление расчетов и эксперимента дает основание сделать следующие выводы:

1. Экспериментально и теоретически показано, что продвижение плоского фронта прозрачного сплава на основе сукцинонитрила при типичных условиях выращивания является существенно нестационарным. Наблюдалось непрерывное смещение положения фронта относительно изотермы, что количественно удовлетворительно описывается расчетом динамики накопления примеси перед фронтом.

2. Вследствие эффектов нестационарности в реальных экспериментальных условиях область параметров устойчивого роста (скорость, тем-пературный градиент, концентрация) зависит от времени наблюдения и существенно ограничивает применимость линейной теории устойчивости фронта кристаллизации.

3. Полученные данные существенным образом влияют на задачу космических экспериментов по получению материалов. Они показывают, что в идеальных условиях выращивания возникает эффект нестационарности, обусловленный физическими процессами на фронте кристаллизации и не может быть устранен даже в условиях невесомости и реализации диффузионного режима роста.

Отсюда следует вывод о необходимости введения внешнего воздействия, которое бы нивелировало указанный негативный эффект и дало возможность получать в космосе материалы с улучшенными свойствами.

РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ БЛОКОВ И УЗЛОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ МОРФОС

Разработана конструкция *рабочего блока* (РБ), предназначенного для создания физических условий, исследования особенностей процессов направленной кристаллизации в условиях микрогравитации, согласно требованиям постановщиков космического эксперимента (КЭ).



Рис. 2. Градиентное устройство: *1* — нагреватель, *2* — холодильник



Рис. 3. Конструктивная схема ЭУ с ЭДВ: 1 — видеокамера, 2 — нагреватель, 3 — охладитель, 4 — корпус ЭУ, 5 — акселерометр, 6 — пружина регулировочная, 7 — ось контейнера, 8 — ходовой винт протяжки, 9 — подвижный кронштейн протяжки, 10 — основание ЭУ, 11 — направляющая контейнера верхняя, 12 — контейнер с модельным веществом, 13 — узел крепления контейнера, 14 — контактная колодка, 15 — токоподводы, 16 — светодиод подсветки, 17 — направляющая контейнера нижняя, 18 — подвижная катушка ЭДВ, 19 — направляющая протяжки, 20 — статор ЭДВ

В состав РБ введены блоки автоматики, драйвера шаговых двигателей перемещения каретки с образцами и видеокамер. Рабочий блок состоит из следующих основных узлов: градиентного устройства; блока видеокамер; герметичного кожуха; опорной плиты; привода перемещения образца. При разработке конструкции РБ выполнены требования обеспечения трех степеней защиты от возможного токсического воздействия исследуемого вещества образца на жилую среду населенного отсека.

Первой ступенью защиты служит герметичная стеклянная оболочка образца. Вторую степень защиты обеспечивает герметичный кожух. Третья степень защиты обеспечивается за счет разницы давлений атмосферы в объемах РБ и населенного отсека станции, что достигается путем заполнения РБ сухим азотом через специальный заправочный клапан.

При разработке РБ были учтены результаты наземных испытаний макетных прототипов установки и данные касающиеся исследовательских образцов, полученные в ходе таких испытаний.

Градиентное устройство (рис. 2) предназначено для создания линейного температурного градиента вдоль оси нагревателя (диапазон регулируемых температур 40...100 °C) и холодильника (диапазон регулируемых температур 10...20 °C), которые имеют внутренние полости цилиндрической формы. Нагреватель и холодильник размещены соосно таким образом, что их полости образуют три параллельных канала для образцов. Нагреватель представляет собой алюминиевый корпус прямоугольного сечения с закругленными боковыми гранями, с тремя отверстиями для перемещения образцов. По периметру корпуса расположен резистивный нагреватель из фольги.

Охладитель представляет собой алюминиевую плиту прямоугольного сечения с тремя отверстиями, соосными с отверстиями нагревателя. На двух противоположных гранях расположены термоэлектрические модули, холодным спаем в сторону холодильника, а горячим — к радиатору.

С целью повышения качества изображений, получаемых от исследуемой области образцов, была проведена доработка блока видеокамер. Разработан блок, который позволяет проводить раздельную юстировку изображений от каждого из трех образцов.

Таким образом, каждая из трех видеокамер оснащена собственным приводом с ходовым винтом (обеспечивает ход каждой видеокамеры



Рис. 4. Общая структурная схема экспериментальной установки

в пределах 30 мм) и блоком концевых выключателей. Система управления позволяет вести раздельную настройку резкости каждой камеры раздельно. Новая конструкция блока видеокамер — это исполнение его в виде отдельной конструкционной единицы с собственным электрическим подключением, что позволяет проводить его наладку и настройку его работоспособности без интеграции в установку.

Дальнейшей актуальной целью работы является изготовление, испытания и отработка раздельного фокусирования изображения исследуемой зоны каждого из трех образцов в процессе направленного затвердевания с использованием системы управления (ход каретки с образцами в пределах 60 мм).

Герметичный кожух рабочего блока, являющийся одной из ступеней безопасности, крепится к несущей опорной плите РБ посредством резинового уплотнения. Конструкция кожуха — сварная, выполнена из алюминиевого сплава. Корпус обрамлен гладкими плоскостями внешней поверхности. Все элементы коммутации с внешними узлами установки (разъемы, заправочные клапаны) расположены на опорной плите.

Выпущен комплект рабочей документации основных узлов новой конструкции рабочего блока. Проведена деталировка корпуса рабочего блока, градиентного устройства и оптической системы.

УЗЕЛ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ

Узел низкочастотной вибрации предназначен для воздействия на расплав в цилиндрическом образце установки для выращивания кристаллов методом Бриджмена. При конструировании узла ставились задачи:

• создания макетного образца вибратора для возбуждения колебаний с разными параметрами в цилиндрическом контейнере лабораторного макета установки, предназначенной для выращивания кристаллов методом Бриджмена;

• создания аппаратных средств регистрации мгновенных значений виброускорения контейнера для определения параметров его колебаний: амплитуды, частоты и формы виброускорения.

На этапе проектирования было разработано техническое задание на работу и эскизная документация (ЭД) макетного образца вибратора в составе:

 эскизная документация механического блока — собственно вибратора, в том числе ЭД узла крепления контейнера и ЭД узла электродинамического вибратора (ЭДВ);

• эскизная документация электронных блоков вибратора (схемы блоков электрические принципиальные и монтажные, схемы соединений): блока подсветки, измерителя ускорения, усилителя тока и блока питания.

На основе разработанной ЭД были изготовлены детали и узлы, укомплектован макетный образец вибратора (один комплект): детали узла крепления контейнера, детали ЭДВ, блок подсветки, измеритель ускорения, усилитель тока, блок питания.

На заключительном этапе были проведены сборка, настройка и контрольные испытания макетного образца вибратора, интегрированного в состав экспериментальной установки (рис. 3, 4).

Технические характеристики изделия. Вибратор обеспечивает следующие параметры синусоидального виброускорения контейнера:

• частота в диапазоне от 5 до 40 Гц,

• амплитуда в диапазоне от 0.1 до 11 *g*.

Конструкция вибратора обеспечивает контроль в реальном времени на осциллографе формы, частоты и амплитуды виброускорения.

Измеритель виброускорения контейнера имеет минимальные массогабаритные характеристики: 20×9×6 мм, масса — 250 г.

Конструкция измерителя виброускорения обеспечивает возможность его работы с необходимой точностью без калибровки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Методами моделирования и прямого наблюдения показана необходимость внешнего воздействия на кристаллизующийся материал, для устранения эффекта нестационарности при направленной кристаллизации в условиях невесомости. Оценены параметры необходимого воздействия и выбран метод низкочастотных вибраций. Спроектированы узлы и системы установки МОРФОС, а также макет вибрационного блока для отработки режимов космического эксперимента.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

€. Л. Живолуб¹, В. М. Ларіончик³, Б. І. Перепеченко², О. П. Федоров^{1,4}

 ¹ Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, Київ
 ² Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, Київ
 ³ ЗАТ «НПП «Техсіс», Київ
 ⁴ Інститут космічних досліджень Національної академії

наук України та Державного космічного агентства України, Київ

НАЗЕМНЕ ВІДПРАЦЮВАННЯ КОСМІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ МОРФОС-В— ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПОВЕРХНІ РОЗДІЛУ ФАЗ ПРИ СПРЯМОВАНОМУ ТВЕРДІННІ МОДЕЛЬНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ СУКЦИНОНІТРИЛУ

Приведено дані розрахунків і експериментальних досліджень умов стаціонарності при спрямованій кристалізації, а також результати проектування окремих вузлів блоків та вібросистеми установки МОРФОС-В.

Ключові слова: фазова границя, фронт кристалізації, сукцинонітрил, математичне моделювання, лінійна теорія стійкості, нестаціонарність, вібраційний вплив, вузол низькочастотної вібрації.

*E. L. Zhivolub*¹, *V. N. Larionchyk*³, *B. I. Perepechenko*², *O. P. Fedorov*^{1,4}

¹G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kviv

³ CJC "R&PE "Tehsys", Kyiv

⁴ Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

GROUND TESTING OF SPACE EXPERIMENT MORFOS-V — AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERFACE DYNAMICS DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF MODEL SUCCINONITRILE-BASED ALLOY

We present the results of our calculations and experimental studies of stationarity conditions in directional solidification, as well as the design and layout of individual nodes, blocks, and vibratory installation MORFOS-V.

Key words: Phase boundary, crystallization front, succinonitrile, simulation, linear theory of stability, non-stationary, vibration action, low vibration unit УДК 520.6.07

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

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭШЕЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА MIR ДЛЯ МИССИИ ЭКЗОМАРС

Программой ЕкзоМарс планируется запуск орбитального зонда к Марсу — Trace Gas Orbiter (TGO). Основной задачей TGO должно стать комплексное изучення атмосферы Марса, исследование вертикального распределение малых составляющих, метана, поиск органических молекул (C_2H_2 , C_2H_6 и т. д.), других малых составляющих, поиск возможных источников и стоков, а также измерения изотопных отношений и их вариаций. Для решения этой задачи разработан ешеле-спектрометр среднего ИК-диапазона MIR, работающий в режиме солнечных затмений в диапазоне 2.2—4.4 мкм с разрешением до 50000. Описана оптическая схема и техническая реализация прибора.

Ключевые слова: атмосфера Марса, изотопный состав, спектрометр высокого разрешения.

MIR — эшеле-спектрометр высокого разрешения, предназначенный для работы на орбите Марса в солнечно-затменном режиме в диапазоне 2.2 — 4.4 мкм с разрешением до 50000. Разделение порядков — скрещённой дисперсией, двумя сменными дифракционными решётками, что позволяет одновременно регистрировать до семнадцати 200-нм полос спектра. Основная задача — прецизионные измерения содержания малых газовых составляющих и их изотопного состава. Кроме того, МІR может обнаруживать метан в надир, используя отдельный детектор, оптимизированный для диапазона 3.3 мкм. В работе обсуждается состояние разработки и техническая реализация прибора.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

В рамках программы ЭкзоМарс Европейское космическое агентство планирует в 2016 г. запуск орбитального зонда к Марсу — Trace Gas Orbiter (TGO). Основной задачей TGO будет комплексное исследование атмосферы Марса, исследование вертикального распределения малых составляющих, в первую очередь метана, поиск органических молекул (углеводородов С₂H₂, С₂H₆ и т. д.), других малых составляющих, поиск возможных источников и стоков, измерения изотопных отношений и их вариаций [4, 6]. Подобная задача может быть решена с помощью спектрометров высокого разрешения в ближнем и среднем ИК-диапазоне. Поэтому было принято решение о создании соответствующего комплекса приборов [2]. Комплект ACS (Atmospheric Chemistry Suit) состоит из трех спектрометров: NIR — эшеле-спектрометр с акустооптической фильтрацией света ближнего ИК-диапазона, MIR — эшеле-спектрометр среднего ИК-диапазона, TIRVIМ — фурье-спектрометр теплового диапазона.

Одной из главных задач прибора MIR является детектирование метана в атмосфере Марса. Планируемые измерения с высокой чувствительностью должны надёжно подтвердить обнаружение или существенно уменьшить значение верхнего предела его содержания в атмосфере [5].

[©] Ю. С. ИВАНОВ, И. И. СИНЯВСКИЙ, М. Г. СОСОНКИН, 2015

Измерения отношения D/H в атмосфере Марса до сих пор опирались на астрономические спектральные наблюдения, причем линии обычной и дейтерированной воды не удавалось измерить одновременно. В связи с этим погрешность измерения D/H остается значительной. Также никогда не был измерен вертикальный профиль отношения HDO/H₂O. В эксперименте MIR полосы поглощения водяного пара могут быть измерены в нескольких порядках и с высокой точностью. Поэтому будет возможно провести одновременные измерения H₂O и HDO с целью повышения точности полученного ранее отношения D/H в водяном паре и измерения его вертикального профиля.

Метод солнечных затмений позволяет также измерять рассеяние света атмосферным аэрозолем на лимбе. Такие измерения необходимо проводить в широком спектральном диапазоне, но наиболее характерные особенности поглощения света частицами атмосферного аэрозоля проявляются в диапазоне длин волн, сравнимом с характерными размерами частиц, т. е. в ближнем ИК-диапазоне. Измерения экстинкции аэрозоля в экспериментах NIR и MIR будут проводиться в спектральных порядках по участкам спектрального континуума между линиями атмосферных газов [3].

Эксперимент также предоставляет широкие возможности для исследования изотопических полос CO₂, а также для поиска новых молекул ат-мосферных газов (например H₂CO, C₂H₆, HCl) [1].

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Прибор построен по классической схеме со скрещённой дисперсией (рис. 1). Излучение от Солнца, пройдя марсианскую атмосферу, зеркалом 1направляется на входной объектив 2. После ломающего зеркала 3 оно фокусируется на входной щели размером 0.4×0.05 мм, а затем коллимируется двухзеркальным коллиматором 4 и попадает на эшеле 5 частотой 3 мм^{-1} и углом блеска 64.43° . Эшеле работает в высоких порядках (от 142 до 258), и смесь спектров этих порядков фокусируется двухзеркальным коллиматором 4в фокальной плоскости линзового коллиматора 6, назначение которого — получение параллельных пучков для дальнейшего разделения этих порядков. Это разделение осуществляется дифракционной решёткой 7, после чего лучи фокусируются камерным трёхлинзовым объективом 8 на охлаждаемой КРТ-матрице 9, образуя строки, соответствующие различным порядкам. Для разделения спектров в заданном широком спектральном диапазоне дифракционная решётка сделана двусторонней. Излучение коротких длин волн разделяется решёткой 361.2 мм⁻¹. При переходе к длинноволновому диапазону решётка поворачивается шаговым приводом на 180°, и в ход лучей вводится её сторона с нарезкой 180 мм-1. В каждой позиции решётка может разворачиваться (тем же приводом) с шагом 1.8° для сканирования по избранному диапазону. При этом на приёмнике формируются 10 кадров (по 5 в каждом диапазоне). В каждом кадре, в зависимости от диапазона, от 7 до 17 строк. Таким образом, длинный спектр с общим разрешением 50...60 тысяч элементов разбивается на 106 строк с поочерёдной укладкой их групп на плоскости приёмника.

Особенностью схемы является наличие у приёмника холодной диафрагмы небольшого размера. Во избежание виньетирования выходной зрачок всей системы должен быть вынесен в плоскость холодной диафрагмы. Достигается это следующим приёмом: наклонное зеркало, расположенное вблизи промежуточного фокуса, и которое обычно выполняет функции коллектива, сделано выпуклым (рис. 2).

При этом расстояние между линзовым коллиматором и дифракционной решёткой увеличено, увеличивается также световой размер линзового коллиматора, но выходной зрачок смещается в плоскость холодной диафрагмы, а приёмник может быть поднят вверх для прижима к радиатору-холодильнику (рис. 3).

АБЕРРАЦИИ

Номенклатура сред для конструирования оптики, прозрачной в ИК-диапазоне, невелика. Кроме того, для удобства юстировки было принято решение использовать среды, прозрачные не только в ИК, но и в видимой области, что дополнительно сузило возможности выбора. Поэтому основной аберрацией MIR является хроматизм



Рис. 3. Укладка выходного зрачка на холодную диафрагму (ход лучей условно развёрнут): *1* — наклонное зеркало, *2* — линзовый коллиматор, *3* — дифракционная решётка, *4* — камерный объектив, *5* — холодная диафрагма

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3



Рис. 4. Продольный хроматизм системы



Рис. 5. Точечные диаграммы, вытянутые астигматизмом и анаморфозой

положения. На графике хроматической кривой (рис. 4) кружками показаны участки длин волн, включённые в расчёт. Поскольку хроматическая кривая плавная, то на остальных участках малый хроматизм обеспечивается автоматически.

Как известно, высокий показатель преломления способствует уменьшению петцвалевой кривизны поля. Поэтому оказалось, что высокопреломляющие «флинтовые» линзы из селенида цинка выгодно делать положительными, а «кроновые» из флюорита — отрицательными. При этом общий баланс аберраций благоприятнее, чем при классическом подходе. Следствием такого приёма явился обратный знак хроматической кривой в широком спектральном диапазоне.

Следующая по значимости аберрация — астигматизм. Но малый астигматизм оказывается даже благоприятным, так как увеличивает высоту спектральной линии несущественно, но за счёт ослабления требований к астигматизму можно «поджать» другие аберрации (например — остаточную кому). На рис. 5 показаны характерные точечные диаграммы системы (слева — в «синей» части диапазона, справа — в «красной»). Чёрные эллипсы — кружки Эйри, вытянутые анаморфозой дифракционной решётки.

АБЕРРАЦИИ И ДИФРАКЦИЯ

В целом качество изображения близко к дифракционному, что подтверждается рис. 6. Пока-



Рис. 6. Наложение сечений спектральных линий с наилучшим качеством изображения



Рис. 7. Наложение сечений спектральных линий с наихудшим качеством изображения

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3
зано около сотни сечений спектральных линий. Основной массив спектральных линий (более 90%) дают сечения, близкие к дифракционным. Поэтому в первом приближении к ним приложим критерий разрешения Рэлея. Из рисунка видно, что для разных длин волн координата первого минимума изменяется от 6 до 9 мкм.

Однако и для худших точек (менее 10 %) сечение характеризуется острым центральным пиком (рис. 7). Первый минимум практически замыт, но видно, что по уровню 1/е разрешение можно оценить величиной от 10 до 15 мкм.

выводы

1. Разработанная оптическая схема компактного эшеле-спектрометра MIR позволяет решить задачи анализа малых составляющих атмосферы Марса.

2. Предварительный анализ разрешающей способности MIR в целом подтверждает расчёты. Оптическая схема потенциально способна обеспечить разрешение порядка 50 000 элементов на спектр.

3. Показано, что в основном качество изображения близко к дифракционному, аберрации существенны лишь для нескольких строк на самых краях спектрального диапазона.

4. Для повышения реального спектрального разрешения необходим субпиксельный анализ. Апостериорная обработка авторами не рассматривалась.

- Korablev O., Montmessin F., Trokhimovsky A., et al. Compact echelle spectrometer for occultation sounding of the Martian atmosphere: design and performance // Appl. Opt. 2013. 52. P. 1054–106
- Korablev O. I., Zakharov A. V., Zelenyi L. M., et al. Observations of the Martian atmosphere from Phobos Grunt Mission // Mars atmosphere: Modelling and observation. – 2011. – P. 469–472.
- Smith M. D., Pearl J. C., Conrath B. J., Christensen P. R. Thermal emission spectrometer results: Mars atmospheric thermal structure and aerosol distribution // J. Geophys. Res. – 2001. – 106, N E10. – P. 23929–23945.
- Vandaele A. C., Daerden F., Drummond R., et al. NOMAD, a spectrometer suite for nadir and solar occultation observations on the ExoMars Trace Gas Orbiter // Mars atmosphere: Modelling and observation. – 2011. – P. 484–487.

- 5. Webster C. R., Mahaffy P. R., Atreya S. K., et al. Low upper limit to methane abundance on Mars // Science. 2013. **342**, N 6156. P. 355–357.
- Zurek R. W., Chicarro A., Allen M. A., et al. Assessment of a 2016 mission concept: The search for trace gases in the atmosphere of Mars // Planet. and Space Sci. – 2011. – 59. – P. 284–291.

Стаття надійшла до редакції 06.02.15

Ю. С. Іванов, І. І. Синявський, М. Г. Сосонкін

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ОПТИЧНА СХЕМА ЕШЕЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА MIR ДЛЯ МІСІЇ ЭКЗОМАРС

Програмою ЕкзоМарс планується запуск орбітального зонда Тгасе Gas Orbiter (TGO) до Марса. Основним завданням TGO має стати комплексне вивчення атмосфери Марса, дослідження вертикального розподілу малих складових, метану, пошук органічних молекул (C_2H_2 , C_2H_6 і т. д.), інших малих складових, пошук можливих джерел і стоків, а також вимірювання ізотопних відносин та їхніх варіацій. Для вирішення цього завдання розроблений ешеле-спектрометр середнього ІЧ-діапазону MIR, що працює в режимі сонячних затемнень в діапазоні 2.2—4.4 мкм з роздільною здатністю до 50000. Описано оптичну схему і технічну реалізацію приладу.

Ключові слова: атмосфера Марса, ізотопний склад, спектрометр високої роздільної здатності

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

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

OPTICAL SCHEME OF THE ECHELLE SPECTROMETER MIR FOR THE EXOMARS MISSION

The ExoMars program provides that the Trace Gas Orbiter (TGO) shall be launched to Mars. The main task is a comprehensive study of the Martian atmosphere and of the vertical distribution of trace gases and methane, in the search for organic molecules (C_2H_2 , C_2H_6 , etc.), the search for possible sources and sinks, as well as in the measurement of isotope ratios and their variations. To solve this problem, the echelle mid-IR spectrometer MIR was designed. MIR operates in the mode of solar eclipses in the range of 2.2–4.4 μ with a resolution of up to 50000. The optical layout and technical implementation of the instrument are described.

Key words: Martian atmosphere, isotopic composition, high resolution spectrometer.

УДК 629.78

О. В. Шульга¹, С. Г. Кравчук², Є. С. Сибірякова¹, А. І. Білінський³, Я. Т. Благодир³, Є. Б. Вовчик³, В. П. Єпішев⁴, І. В.Кара⁵, Є. С. Козирєв¹, М. І. Кошкін⁵, В. І. Кудак⁴, М. О. Куліченко¹, І. В. Любич⁶, О. Е. Мажаєв¹, К. А. Мартинюк-Лотоцький³, Я. О. Романюк², С. С. Терпан⁵, Л. С. Шакун⁵

¹ Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

² Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

³ Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету, Львів

⁴Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

⁵ Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету», Одеса

⁶Державний міжвузівський центр «Оріон»

РОЗВИТОК УКРАЇНСЬКОЇ МЕРЕЖІ ОПТИЧНИХ СТАНЦІЙ УМОС ЯК СКЛАДОВОГО ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НАВКОЛОЗЕМНОГО КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

Українську мережу оптичних станцій УМОС створено в 2011 р. з метою вивчення та контролю космічних об'єктів в навколоземному просторі. В роботі описані склад, інструменти та основні завдання мережі УМОС.

Ключові слова: навколоземний космічний простір, потенційно небезпечні космічні об'єкти.

вступ

Космічні об'єкти, що проходять поблизу Землі (зокрема астероїди), космічні апарати, що вичерпали свій ресурс чи вийшли з ладу, елементи ракет-носіїв та їхні уламки, кількість яких в навколоземному просторі катастрофічно зростає, несуть потенційну загрозу не тільки для безпечної роботи космічної техніки, але й регіональну чи навіть глобальну загрозу для наземних об'єктів.

Так, на сьогодні відомі характеристики 1561 астероїда з розмірами, що перевищують 100 м, які можуть становити загрозу для нашої планети. Але це лише незначна частка потенційно небезпечних космічних об'єктів. Навколо Землі обертаються близько 8000 створених людством штучних космічних об'єктів, серед яких лише 2500 — це супутники, що ще функціонують чи вичерпали свій ресурс. Інші об'єкти, так зване космічне сміття, — це захисні кожухи космічних апаратів, елементи та уламки ракет, паливні баки тощо.

Якщо ж взяти до уваги об'єкти з розмірами до 1 см, то їхня кількість складає мільйони. У зв'язку із зростаючою загрозою зіткнень космічних об'єктів у навколоземному просторі все актуальнішою стає задача контролю за чистотою навколоземного космічного простору.

В США під егідою NASA створено спеціальну програму виявлення потенційно небезпечних об'єктів, до якої залучені як космічні, так і наземні засоби спостереження. В останні роки в Європейському Союзі активно ведеться підготовка програми моніторингу космічного сміття.

[©] О. В. ШУЛЬГА, С. Г. КРАВЧУК, Є. С. СИБІРЯКОВА,

А. І. БІЛІНСЬКИЙ, Я. Т. БЛАГОДИР, Є. Б. ВОВЧИК,

B. П. ЄПІШЕВ, І. В.КАРА, Є. С. КОЗИРЄВ, М. І. КОШКІН,

В. І. КУДАК, М. О. КУЛІЧЕНКО, І. В. ЛЮБИЧ, О. Е. МАЖАЄВ, К. А. МАРТИНЮК-ЛОТОЦЬКИЙ, Я. О. РОМАНЮК,

 $C \subset TEDDAH \square C IIIAVVH 2015$

Враховуючи наукові здобутки України в космічній галузі, в галузі моніторингу ближнього космосу, наявні спостережні ресурси та кадровий потенціал, а також досягнення у розробці нових методів визначення координат космічного сміття та його геометричних і функціональних характеристик наша країна розглядається як потенційний учасник міжнародної системи моніторингу навколоземного космічного простору.

МЕРЕЖА УМОС

Українську мережу оптичних станцій було створено в 2011 р. з метою організації систематичного дослідження та контролю засмічення навколоземного космічного простору. Основні завдання мережі УМОС:

• регулярні позиційні спостереження,

• уточнення орбітального руху космічних об'єктів (KO),

• дослідження форми та періоду обертання КО,

• фотометричні спостереження штучних КО,

• підтримка каталогу елементів орбіт КО,

• підтримка спеціалізованого інформаційного сайту УМОС.

УЧАСНИКИ МЕРЕЖІ УМОС ТА ЗАСОБИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

До складу мережі на 2014 р. входять:

• Головна астрономічна обсерваторія НАН України (ГАО),

• НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО),

• НДІ «Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету (АО ОНУ),

• Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету (АО ЛНУ),

 Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету (ЛКД УжНУ),

• Державний міжвузівський центр «Оріон» (ДМЦ «Оріон»),

• Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП).

З кінця 2014 р. до виконання окремих завдань мережі УМОС з контролю космічного простору підключилась Андрушівська астрономічна обсерваторія.

У складі УМОС налічується 10 діючих телескопів. Технічні характеристики телескопів, які

Організація/телескоп	<i>D</i> , мм	F/D	Тип камери	Поле зору, град	Тип спостережень	Фотомет- рична смуга	Зоряна величина
АО ЛНУ, м. Львів ЛД-2 (Юпітер-9)	42	2	LCL-902Н 795×596 8.6×8.3 мкм	4.2×3.2	CCTV	Інт.	1 1
АО ЛНУ, м. Львів ГЛД-250	250	5	CCD SXV-9M	0.4×0.3	Добовий суп- ровід	V, Інт.	15
ГАО НАНУ, м. Київ Целестрон (Геліос-40)	56	1.5	WAT-902H2 752×582 8.6×8.3 мкм	4.2×3.2	CCTV	Інт.	11
ДМЦ «Оріон», м. Алчевськ ТПЛ-1М (гід)	80	2.5	WAT-902H2 752×582 8.6×8.3 мкм	1.7×1.4	CCTV	Інт.	10
ЛКД УжНУ, м. Ужгород ТПЛ-1М (гід)	56	1.5	ССТV 795×596 8.6×8.3 мкм	4.2×3.2	CCTV	Інт.	11
НДІ АО ОНУ, м. Одеса КТ-50	500	4	WAT-902H2 752×582 8.6×8.3 мкм	0.18×0.14	Супровід по ви- димій траєкторії	Інт.	11
НДІ МАО, м. Миколаїв МОБІТЕЛ КТ-50	500	6	Alta U9000 3056×3056, 12×12 мкм	0.7×0.7	TDI	R	18
НДІ МАО, м. Миколаїв МОБІТЕЛ ТВ	48	2.8	WAT-902H2 752×5828.6×8.3 мкм	2.6×2.0	CCTV	Інт.	11
НДІ МАО, м. Миколаїв АФУ-75	260	2.9	Alta U9000 3056×3056 12×12 мкм	2.8×2.8	TDI	R	16
ЦПОСІ і КНП, м. Дунаївці АЗТ-28	500	16	ТВ трубка	0.2×0.25	Супровід по ви- димій траєкторії	В, Інт.	12

Таблиця 1. Характеристики телескопів мережі УМОС

Назва КО	Висота орбіти, км	Призначення
КС на низьких орбітах, де впливає атмосфера КС низьких орбітах, де не впливає атмосфера	420—1400 1400—2500	Поліпшення теорії руху КО
Низькоорбітальні КО з кутовими відбивачами Навігаційні КО з кутовими відбивачами	440—1500 ~20000	Оцінка точності спостережень
Геосинхронні об'єкти КС	~36000	Планові спостереження
Фрагменти запуску ракети «Дніпро» з ШСЗ «Січ-2» Підтримка експерименту «Інтерферометр РТ-70» Список ЦК КП України	~700 км 2000—36000 300—36000	Спостереження на замовлення сторонніх організацій
Лазерно активний ГСС ARTERMIS Високоеліптичний супутник «Спектр-Р» Мінісупутники ДЗЗ («RapidEye») Мінісупутники комунікаційні («Orbcomm») Наносупутники розмір 10×10×10 см («CubeSat»)	~36000 600—340000 630 660—790 450—830	Оцінка можливості спостере- жень

Таблиця 2. Типи та призначення КО, відібраних для спостережень

застосовуються мережею УМОС для спостережень, представлені в табл. 1.

позиційні спостереження

Основна мета позиційних спостережень — формування каталогів положень та елементів орбіт КО.

Для позиційних спостережень мережею УМОС застосовуються такі методи:

1) добовий супровід телескопом,

 2) ССТV — спосіб накопичення кадрів із зсувом [1],

3) супровід КО по видимій траєкторії,

4. TDI — режим синхронного переносу заряду (time delay and integration) [2].

Формування робочого списку КО здійснювалось на основі моделювання видимості обраних КО протягом одного місяця з телескопів НДІ МАО. До робочого списку потрапляли КО, які були видимі кожну ніч як мінімум по 4 хв.

За період з 2011р. по 2014 р. станціями мережі отримано 165992 положень 982 КО, з яких сформовано каталог положень. У табл. 3 представлено кількість отриманих положень за типом орбіти.

Мережею було проведено 331 ніч спостережень. Загальну статистику наповнення каталогу положень по роках наведено у табл. 4. Під проводкою мається на увазі спостереження КО на одному витку орбіти з одного телескопа. Для аналізу точності спостережень телескопів мережі УМОС виконано оцінку внутрішньої і зовнішньої похибки отриманих положень КО. Розраховані середні значення випадкової і систематичної складових похибок для різних телескопів і типів орбіти (табл. 5).

Подальша обробка каталогу положень включала такі етапи:

1) розрахунок статистики спостережень,

2) одновіковий розрахунок елементів орбіт,

3) підготовка вхідних даних для багатовиткового розрахунку орбіт,

4) багатовитковий розрахунок орбіт,

5) розрахунок ефемерид КО за отриманим каталогом орбіт у вигляді векторів стану,

6) розрахунок елементів орбіти у форматі TLE із застосуванням аналітичної моделі руху SGP4 по ефемеридах KO,

Таблиця 3. Наповнення каталогу положень за типом орбіти КО

Тип КО	Кількість об'єктів	Кількість положень	
Геосинхронні	39	4422	
Середньоорбітальні	47	2103	
Низькоорбітальні	896	159467	

Рік	Кількість об'єктів	Кількість проводок	Кількість положень	Загальна тривалість спостережень, хв	Кількість ночей
2011	79	271	1558	784.05	10
2012	325	1859	63351	49049.36	95
2013	318	2417	48380	52129.79	108
2014	260	3633	52703	19436.55	118
Всього	982	8180	165992	121399.75	331

Таблиця 4. Статистика наповнення каталогу положень КО по роках

7) формування даних для розміщення на зовнішньому сайті УМОС,

8) розрахунок похибок ефемерид шляхом порівняння із каталогом положень,

9) аналіз похибок ефемерид.

З каталогу положень для КО, які спостерігались більш ніж на двох сусідніх витках, було розраховано 1450 наборів елементів орбіт у TLEформаті. За елементами орбіт обчислені ефемериди у вигляді векторів стану у форматі СРF. Всі обчислені елементи орбіт та ефемериди представлено на сайті УМОС.

За каталогом ефемерид проведений аналіз точності шляхом порівнянням отриманих ефемерид з результатами спостережень. Результатом порівняння є графіки залежності різниці між даними спостережень та ефемеридою уздовж орбіти dL та поперек орбіти dH від різниці t епох орбіти та спостережень.

На рис. 1 та 2 наведено залежності точності обчислення ефемерид від різниці епох для низь-

на різних телескопах мережі						
Обсерваторія Телескоп		Тип орбіти	Середня систематич- на похибка	скп		
НДІ МАО	KT-50	LEO	1.2"	0.6″		
НДІ МАО	TBT	LEO	2″	2.5″		
НДІ МАО	АФУ-75	LEO	2″	10″		
НДІ МАО	KT-50	MEO/GEO	0.7″	0.3″		
НДІ МАО	АФУ-75	MEO	2″	1.0"		
НДІ АО ОНУ	KT-50	LEO	0.5″	0.5″		
АО ЛНУ	ЛД-2	LEO	3″	4″		
ЛКД УжНУ	ТПЛ-1М	LEO	_	4.5″		
ДМЦ «Оріон»	ТПЛ-1М	LEO	_	2.5"		

Таблиця 5. Похибки спостережень на різних телескопах мережі

коорбітального та геосинхронного КО. З рисунків можна зробити висновок про те, що точність ефемериди поперек орбіти значно краща, ніж уздовж орбіти. Похибка ефемериди уздовж орбіти має залежність від часу прогнозу, близьку до лінійної.





Рис. 1. Похибки ефемериди (сірі точки — dL, чорні точки — dH, пряма лінія — dL = -44.11t - 14.44) для низькоорбітального КО 16098 (1490 км), орбіту розраховано за двома проводками на базі 1.075 витка



Рис. 2. Похибки ефемериди (сірі точки — dL, чорні точки — dH, пряма лінія — dL = -1.642t - 15.17) для геосинхронного КО 17125 (35800 км), орбіта розрахована за двома проводками на базі 2.53 витка

WEB-САЙТ УМОС

Web-сайт УМОС призначено для надання широкого доступу до інформації про учасників УМОС та демонстрації результатів роботи мережі. Web-сайт УМОС працює на сервері ГАО НАН України. Адреса сайту http://umos.mao. kiev.ua. Розробка інтерфейсу сайту та наповнення даними здійснюється у НДІ МАО. На сайті міститься інформація про принципи функціонування УМОС, опис станцій учасників мережі з фотографіями телескопів, інформація про склад та основні технічні характеристики телескопів, технічні параметри оптико-електронних систем телескопів та їхні географічні координати у табличному вигляді. Крім того, на сайті розміщено каталог орбіт КО у вигляді таблиці, відсортованої по номеру супутника, який містить номер NORAD, міжнародний код, назву, висоту перигею, висоту апогею, нахил орбіти, період обертання, кількість обчислених наборів елементів орбіт. Для кожного КО у таблиці доступні посилання на текстові файли з елементами орбіт у форматі TLE та ефемеридами у форматі CPF. З 2014 р. функціонує англомовна версія сайту, додано елементи орбіт та ефемериди KO, розраховані за даними спостережень у 2014 р.

ФОТОМЕТРИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Основною метою фотометричних спостережень була розробка методик обробки фотометричної інформації та отримання кривих блиску обраних КО. До списку обраних КО були включені 20 супутників: «Мідас-3», «Мідас-4», «Мідас-6», «Мідас-7», IRAS, «Аджисай», «Топекс», «Січ-1», ARTEMIS, «Енвісат», «Єгиптсат-1», «Сbers 2B», SL-24 DEB, «Січ-2», «Фобос-Грунт», «Космос-2486», SL-24 R/B, «Деймос-2», «Казеосат-1». Основною метою їхніх спостережень є розробка методики виявлення КО з різним характером стабілізації у просторі (тривісна стабілізація, одновісна стабілізація або стабілізація через обер-

Таблиця 7. Статистика фотометричних спостережень за окремими КО

Номер NORAD	Назва	Одеса	Львів	Ужгород	Дунаївці	Євпаторія
00163	«Мідас-3»	10	_	_	_	3
00192	«Мідас-4»	3	_	3	_	2
00574	«Мідас-6»	6	_	2	_	3
00622	«Мідас-7»	5	_	5	_	2
13777	IRAS	5	2	_		_
16908	«Аджисай»	110	3	9	4	19
22076	«Топекс»	61	_	8	3	13
23657	«Січ-1»	_	_	_	_	3
26863	ARTEMIS	_	_	_	_	4
27386	«Енвісат»	51	_	4	7	11
31117	«Єгиптсат-1»	4	_	_	1	22
32062	«Cbers 2B»	35	_	_	5	_
36602	SL-24 DEB	7	_	_	_	_
37794	«Січ-2»	49	2	10	_	84
37872	«Фобос-Грунт»	_	2	_	_	5
39177	«Космос-2486»	13	_	_	8	_
39228	SL-24 R/B	_	_	_	_	6
39731	«Казеосат-1»	19	_	_	7	_
40013	«Деймос-2»	1	_	_	_	_
40048	SL-24 DEB	1	_	—	—	—



Рис. 3. Крива блиску «Січ-2» під час періоду активного життя (21 травня 2012 р.)



Рис. 4. Крива блиску «Січ-2» після закінчення періоду активного життя (2 серпня 2013 р., P = 6.78 с)

тання, вільне обертання некерованого тіла із прецесією).

Протягом 2011—2014 рр. п'ять станцій спостережень взяли участь у фотометричних спостереженнях. Всі дані спостережень представлено на сайті та ftp-сервері УМОС у табличному та графічному вигляді.

У табл. 7 наведено дані про кількість отриманих кривих блиску КО зі списку УМОС.

Всього мережею отримано 642 кривих блиску 20 KO.

Для визначення типу стабілізації КО на орбіті використовувалися вимірювання блиску КО з одного або декількох пунктів спостереження. Звісно, ця інформація має оціночний характер, і для остаточного визначення типу або параметрів стабілізації необхідно порівнювати спостережні дані із модельними розрахунками. Одним із поширених типів стабілізації діючих супутників Землі є орієнтування одної осі тіла в надир. Це досягається коли період обертання КО навколо центра мас збігається з орбітальним періодом. При цьому лише одна вісь тіла є сталою — вісь, яка є нормальною до площини орбіти КО. З часом і на цю вісь діє прецесія разом з прецесією орбіти. Таким чином орієнтуються всі космічні апарати, призначені для дослідження Землі із космосу.

Прикладом порівняння кривих блиску стабілізованого та не стабілізованого КО є криві блиску українського супутника «Січ-2» (номер NORAD 37794), призначеного для дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Форма супутника короб з чотирма панелями сонячних батарей. Криву блиску під час періоду активного існування «Січ-2», яка спостерігалася у Одесі 21 травня 2012 р., наведено на рис. 3.

Як бачимо, крива блиску після приведення до стандартних умов (винесення «за атмосферу» та «віднесення» на 1000 км) демонструє невеликі зміни, що обумовлені зміною ракурсу видимості КО та відбиттям світла на неоднорідній поверхні тіла. Відсутність періодичних (циклічних) коливань блиску є ознакою такого типу стабілізації.

Однак після закінчення періоду активного життя супутника його крива блиску суттєво змінилася — тепер він демонструє періодичні коливання блиску. Тобто, була розбалансована стабілізація КО дією зовнішніх збурень, насамперед взаємодією з розрідженою атмосферою Землі. Іншою причиною виникнення швидкого обертання КО може бути залишкова дія некерованих



Рис. 5. Криві блиску КО 16908 «Аджисай», синхронно отримані 3 листопада 2014 р. на станціях спостережень у Одесі та Львові



Рис. 6. Криві блиску КО 16908 «Аджисай», синхронно отримані 27 жовтня 2014 р. на станціях спостережень у Одесі та Ужгороді



Рис. 7. Криві блиску КО 16908 «Аджисай», синхронно отримані 28 липня 2014 р. на станціях спостереження у Одесі та Дунаївцях

маховиків. Криву блиску КО «Січ-2», отриману в Одесі 2 серпня 2013 р., приведено на рис. 4.

Фотометричні спостереження, отримані одночасно в різних обсерваторіях мережі, мають додатково збільшену інформативність. У 2014 р. пунктами УМОС здобуто низку синхронних спостережень:

КО 13777 Одеса — Львів — 2 проходження; КО 22076 Одеса — Ужгород — 1 проходження; КО 16908 Одеса — Євпаторія — 4 проходження;

КО 16908 Одеса — Львів — 2 проходження;

КО 16908 Одеса — Ужгород — 6 проходжень;

Безумовно, лише високоякісні спостереження можуть бути ефективно використані для спільної обробки та здобуття корисного результату у вигляді орієнтації осі обертання КО або періоду чи типу стабілізації КО і його орієнтації у момент спостереження. Особливо важливим в цьо-

му сенсі є надійна прив'язка власної шкали часу приймальної апаратури до стандартної світової шкали UTC. Тобто, синхронні спостереження мають бути синхронними принаймні до величини «часу інтегрування» δ*t*.

На рис. 5 наведено дві криві блиску, синхронно отримані на станціях спостережень у Одесі та Львові. Для наочного збігу моментів спалахів на кривих блиску вісь часу для одеських вимірювань зсунута на відоме значення (–167.706 с), що включає в себе 74 повних оберти супутника. Однак між двома шкалами часу крім цього спостерігається нев'язка, яка дорівнює 0.1145 с.

Розташування та послідовність спалахів на кривих тотожні тільки на короткому інтервалі часу (на 2-3 оборотах, які відбиті вертикальними лініями), тому що умови спостереження різні та координати бісектриси фазового кута (насамперед схилення) змінюються із різною швидкістю.

На рис. 6 наведено дві криві блиску, синхронно отримані на станціях спостережень у Одесі та Ужгороді. Для збігу моментів спалахів на кривих блиску вісь часу для одеських вимірювань зсунуто на необхідне значення (–77.0226 с), що включає в себе 34 повних обороти супутника. При цьому між двома шкалами часу також спостерігається невелика нев'язка, яка дорівнює 0.0503 с. Така нев'язка менша, ніж «час інтегрування» при спостереженнях в Ужгороді, тому не є достовірною та впливовою.

На рис. 7 наведено дві криві блиску, синхронно отримані на станціях спостереження у Одесі та Дунаївцях. Для збігу моментів спалахів на кривих блиску вісь часу для одеських вимірювань зсунуто на відоме значення (–377.9028 с), що включає в себе 167 повних оберти супутника. У Дунаївцях при спостереженнях використовується велике значення часу інтегрування (0.1 с). Однак між двома шкалами часу виявляється дуже велика нев'язка, яка дорівнює 0.539 с.

Таким чином, проведені синхронні фотометричні спостереження КО «Аджисай» дозволили провести зіставлення шкал часу на всіх чотирьох пунктах спостережень та виявити нев'язки.

висновки

1. В рамках програми систематичних координованих координатних спостережень КО за 2011 — 2014 рр. отримано 165992 положень 982 КО.

2. Забезпечено підтримку та регулярне наповнення каталогу положень УМОС.

3. За каталогом положень УМОС здійснено розрахунок орбіт із застосуванням позиційних спостережень на декількох витках: отримано більш ніж 1450 орбіт у TLE-форматі, за якими розраховано ефемериди у форматі СРF.

4. Мережею УМОС проведено координовані фотометричні спостереження низькоорбітальних КО. Отримано 642 кривих блиску 20 КО. Проведено зіставлення шкал часу на чотирьох пунктах спостережень та виявлено нев'язки.

5. Створено Web-сайт УМОС. Здійснюється підтримка та розвиток сайту: створено англомовну версію, додано елементи орбіт та ефемериди KO, розраховані за даними спостережень.

- 1. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных объектов околоземного космического пространства с использованием способа накопления кадров со смещением // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 83—87.
- Kara I. V., Kozyryev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects // Bull. Crimean Astrophys. Observatory. – 2011. – 107. – P. 98–102.

Стаття надійшла до редакції 24.03.15

А. В. Шульга¹, С. Г. Кравчук², И. С. Сибирякова¹, А. И. Билинский³, Я. Т. Благодир³, Е. Б. Вовчик³, В. П. Епишев⁴, И. В. Кара⁵, Е. С. Козырев¹, Н. И. Кошкин⁵, В. И. Кудак⁴, Н. А. Куличенко¹, И. В. Любич⁶, А. Э. Мажаев¹, К. А. Мартинюк-Лотоцкий³, Я. О. Романюк², С. С. Терпан⁵, Л. С. Шакун⁵ ¹ Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев ² Главная астрономическая обсерватория Национальной

академии наук Украины, Киев ³ Астрономическая обсерватория Львовского национального университета, Львов ⁴ Лаборатория космических исследований Ужгородского национального университета, Ужгород

⁵ Научно-исследовательский институт

«Астрономическая обсерватория Одесского

национального университета», Одесса

⁶ Государственный междувузовский центр «Орион»

РАЗВИТИЕ УКРАИНСКОЙ СЕТИ ОПТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ УМОС КАК СОСТАВНОГО ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Украинская сеть оптических станций УМОС создана в 2011 г. с целью изучения и контроля за космическими объектами в околоземном пространстве. В работе описаны состав, инструменты и основные задачи сети УМОС.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, потенциально опасные космические объекты. A. V. Shulga¹, S. G. Kravchuk², Y. S. Sybiryakova¹,
A. I. Bilinsky³, Ya. T. Blagodyr³, E. B. Vovchyk³,
V. P. Epishev⁴, I. V. Kara⁵, Y. S. Kozyryev¹, N. I. Koshkin⁵,
V. I. Kudak⁴, N. A. Kulichenko¹, I. V. Lubich⁶,
A. E. Mazhaev¹, K. P. Martynyuk-Lototsky³,
Ya. O. Romanyuk², S. S. Terpan⁵, L. S. Shakun⁵

¹ Research Institute Mykolaiv Astronomical Observatory, Mykolaiv

² Main Astronomical Observatory of National Acsdemy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³ Research Institute Astronomical Observatory of Lviv National University, Lviv

⁴Space Research Laboratory of Uzhgorod National University, Uzhgorod

⁵ Research Institute Astronomical Observatory of Odessa National University, Odessa

⁶ State Interuniversity Center «Orion»

DEVELOPMENT OF UKRAINIAN NETWORK OF OPTICAL STATIONS UMOS AS COMPONENT OF CONTROL SYSTEMS FOR NEAR-EARTH SPACE

Ukrainian network of optical stations UMOS was established in 2011 to study and control near-Earth space objects. The paper describes the structure, tools, and basic tasks of UMOS network.

Key words: near-Earth space, potentially dangerous space objects.

УДК 621.371+537.86

О. В. Кривенко¹, А. Г. Лауш², В. І. Луценко¹, І. В. Луценко¹, Д. О. Попов¹, І. В. Попов¹, О. В. Соболяк³

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків ² ТОВ «Навіс-Україна», Сміла

³Харківське конструкторське бюро машинобудування ім. О. О. Морозова, Харків

ВИКОРИСТАННЯ ВИПРОМІНЮВАНЬ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ТА ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ЦЕНТРІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Приводяться результати експериментальних досліджень впливу сонячної радіації на сигнали телевізійних центрів на заобрійній трасі та сигнали глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Запропоновано нові способи та методики оцінювання рефракційних властивостей атмосфери і визначення зон опадів. Опрацьовано метод визначення рефракційних властивостей тропосфери з використанням кутів приходу сигналів УКХ та ГНСС. Запропоновані підходи дозволять розвинути методи дистанційного зондування та можуть використовуватися при створенні системи глобального моніторингу Землі та атмосфери.

Ключові слова: атмосферна рефракція, глобальні навігаційні супутникові системи, дистанційне зондування, небезпечні метеорологічні явища, УКВ-сигнали, тропосфера.

ВСТУП

Вивчення фізичних процесів у тропосфері необхідне для розуміння нестійких атмосферних проявів, що виявляються у великомасштабних флуктуаціях і обумовлюють зміни погоди, а також чинників, що визначають статистичні властивості загальної циркуляції атмосфери.

Для моніторингу атмосфери та прогнозування небезпечних метеоявищ широко використовують радіолокаційні засоби — метеорологічні радари. Однак їхнє використання вимагає значних матеріальних і енергетичних витрат і дозволяє організувати моніторинг території на відстанях не більше 200 — 300 км від радара. Для забезпечення моніторингу всієї території країни необхідне розміщення великої кількості радарів, що потребує великих матеріальних витрат. Крім того, для теперішнього часу характерне істотне електромагнітне «забруднення» середовища, тому надзвичайно привабливо використовувати для рішення задач моніторингу атмосферних процесів і небезпечних явищ природи випромінювання діючих ШСЗ (навігаційних, метеорологічних або телевізійних), а також наземних телевізійних центрів.

Відомо, що ефективність роботи радіотехнічних систем різного призначення (навігації, радіолокації, зв'язку) значною мірою залежить від умов поширення радіохвиль, які визначаються станом атмосферної рефракції, котра, в свою чергу, обумовлена просторово-часовим розподілом коефіцієнта заломлення *n*. Традиційно його

[©] О. В. КРИВЕНКО, А. Г. ЛАУШ, В. І. ЛУЦЕНКО, І. В. ЛУЦЕНКО, Д. О. ПОПОВ, І. В. ПОПОВ,

О. В. СОБОЛЯК, 2015



Рис. 1. Значення індекса сонячної активності W (крива 1) і приземного коефіцієнта заломлення n (крива 2) у 2009—2014 рр.

визначають вимірюванням атмосферних параметрів — температури, тиску, вологості за допомогою метеодавачів або безпосередньо рефрактометричними вимірюваннями *n*, як у фіксованих точках простору, так і при переміщенні давачів.

В останнє десятиріччя активно розробляються методи неконтактного зондування атмосфери: радіометричний, радіолокаційний, метод радіопросвічування та інші. Такі методи вигідно відрізняються від контактних можливістю більш ефективного огляду великих територій.

АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ

Метою роботи було проведення експериментальних досліджень та аналізу впливу сонячної радіації на сигнали телевізійних центрів на заобрійній трасі і ГНСС-сигнали, створення нових способів та методик оцінювання рефракційних властивостей атмосфери та підстильної поверхні, опрацювання методу визначення рефракційних властивостей тропосфери з використанням кутів приходу сигналів УКХ та ГНСС.

Для вирішення цих задач використовувалось випромінювання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС): російської (ГЛОНАСС) і американської (GPS) та телевізійних центрів.

Для експериментальних досліджень створено вимірювальний комплекс, до складу якого входять: система реєстрації телевізійних УКХсигналів на заобрійній трасі, три одночастотні приймачі СН-4719, один СН-4706 та один двочастотний приймач БРИЗ — всі вітчизняного виробництва (розробки ТОВ «Навіс-Україна»), які дозволяють реєструвати сирі дані ГНСС. Для контролю метеорологічної ситуації на трасах поширення радіохвиль додатково вимірювався коефіцієнт заломлення тропосфери за допомогою створеного радіорефрактометра та штатних метеопараметрів (тиску, вологості, температури) з використанням розробленої портативної метеостанції. Крім того, контролювався хмарний покрив в оптичному та інфрачервоному діапазонах за допомогою приймача сигналів метеорологічних супутників NOAA.



Рис. 2. Флуктуаційний компонент змін коефіцієнта заломлення



Рис. 3. Щільності розподілу коефіцієнта заломлення для м. Харкова і їхня апроксимація: *a* — дані метеоцентру (крива *1* — зима, *2* — весна, *3* — літо, *4* — осінь); *б* — полігауссова апроксимація; *в* — апроксимація функціями Кравченка (*1* — експеримент, *2* — апроксимація)



Рис. 4. Вплив затемнення Сонця на поводження: a — сигналу *S* VKX на заобрійній трасі (*1*) і коефіцієнта заломлення тропосфери (*2*); δ — результати похилого зондування іоносфери за даними Миколаївської обсерваторії (момент t = 0 відповідає часу 15:00 UT 28 березня 2006 р.)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СОНЦЯ НА АТМОСФЕРУ Землі та умови поширення радіохвиль

Проведено дослідження впливу Сонця на характеристики сигналів ГНСС та телевізійних центрів. Вивчення сезонних змін характеристик тропосфери для різних регіонів України з використанням архіву штатних даних метеорологічних центрів (близько 100 міст) дозволило встановити, що для коефіцієнта заломлення характерна наявність сильних добових і сезонних залежностей, обумовлених змінами темпе-



Рис. 5. Сезонні зміни рефракційних властивостей тропосферного каналу поширення, отримані за даними рівня сигналу УКХ на заобрійній трасі: 1— нормальна, 2 підвищена, 3— інверсійні шари, 4— наявність підвищеної рефракції та інверсійних шарів





ратури, тиску й вологості. Показано, що взимку для всіх міст, незалежно від їхнього місцезнаходження, коефіцієнт заломлення тропосфери має значення близько 310 N-одиниць, тоді як влітку максимальні його значення залежать від місця розташування міста. Встановлено, що трендові зміни коефіцієнта заломлення досить сильно корелюють зі змінами сонячної активності (рис. 1). На рис. 2 показано флуктуаційний компонент змін коефіцієнта заломлення. Закони розподілу коефіцієнта заломлення відрізняються від стандартних гауссівських моделей.

Для врахування нестаціонарності поведінки коефіцієнта заломлення запропоновано статистичні моделі тропосфери на основі вкладених напівмарківських процесів [1, 9].

Показано можливість опису статистик коефіцієнта заломлення усередині сезону локально гауссовою моделлю (рис. 3, δ).

Уперше розглянуто використання фінітних атомарних функцій Кравченка для опису статистик коефіцієнта заломлення (рис. 3, *в*) [9]. Запропоновано новий підхід перевірки гіпотез про вид розподілу випадкової величини, заснований на використанні зворотних функцій [9].

З використанням архіву записів сигналів *S* УКХ на заобрійних трасах починаючи з 2003 р. проаналізовано вплив сонячних затемнень на характеристики телевізійних сигналів (рис. 4).

З використанням записів рівня заобрійного сигналу УКХ (частота 175 МГц) телевізійного центру м. Бєлгород (довжина траси близько 71 км) вивчено сезонні та добові зміни тропосферної рефракції, обумовлені сходами/заходами Сонця та його річним ходом.

Залежність рівня сигналу телевізійного центру за радіообрієм дала можливість розробити метод діагностики тропосферної рефракції за зміною рівня сигналу протягом доби та виявлення на трасі поширення інверсійних шарів (рис. 5).

Сезонні та добові зміни коефіцієнта заломлення тропосфери та іоносфери під впливом сонячної радіації призводять до появи пов'язаних з ними сезонних та добових похибок вимірювання висоти (рис. 6) та псевдодальності за сигналами ГНСС (рис. 7). Взимку додатковий приріст псевдодальності за рахунок тропосфери суттєво



Рис. 7. Сезонні прирости псевдодальності ΔL (1 — літо, 2 — зима)

більший, ніж влітку. Аналіз змін вимірюваної висоти і псевдодальності протягом року показав, що сучасні зараз моделі тільки частково дозволяють компенсувати сезонні зміни цих параметрів. Тому потрібна їхня модернізація для врахування добових змін.

МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ АТМОСФЕРИ ТА ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Розглянуто можливість використання кутів приходу сигналу на заобрійній трасі для оцінки рефракційних властивостей тропосфери. Розроблено методику оцінки градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери за кутами приходу сигналу ШСЗ (рис. 8, 9).

Для вивчення сезонної та добової залежностей коефіцієнта заломлення тропосфери, а також встановлення зв'язку між ним та рівнями сигналів ШСЗ і телевізійного центру проаналізовано метеорологічні характеристики (дані взяті з сайтів метеоцентрів) для різних регіонів країни. Порівняння цих даних дозволило визначити вплив тропосферної рефракції на умови поширення УКХ та ГНСС сигналів і їхні характеристики. Все це вкрай необхідно для підвищення точності визначення координат, моніторингу підстильної поверхні та атмосферних процесів і виявлення небезпечних метеоявищ.



Рис. 8. Залежність рівня сигналу ШСЗ від кута β: 1 — літо, 2 — зима



Рис. 9. Кут радіозаходу при різних коефіцієнтах заломлення *n*

Продемонстровано можливості діагностики атмосфери та підстильної поверхні за прийнятими ГНСС-сигналами. Окрім того, рівень флуктуацій сигналу ГНСС може використовуватись для визначення шорсткості підстильної поверхні. Для цього потрібне виділення з прийнятої амплітуди сигналу флуктуаційної та трендової складових, за якими і оцінювати як величину тропосферної рефракції, так і ступінь шорсткості поверхні розподілу.



Рис. 10. Середнє квадратичне значення σ флуктуацій псевдовідстані від кута спостереження супутника ГНСС: *а* — шарувато-купчасті хмари 6 балів, нижній край основного ярусу 1000 — 1500 м; *б* — ясно, 0 балів

Встановлена залежність кутів радіозаходу та радіосходу ШСЗ може використовуватися для прогнозування дальності дії радіосистем.

Вимірювання псевдовідстаней та змін координат вимірювального пункту були використані для виявлення вологонасичених хмар на трасі поширення сигналу (рис. 10).

Експериментально встановлений вплив зон опадів на характеристики сигналів ГНСС дозволив розробити методику оцінки інтенсивності опадів [2, 5—8, 10]. За даними, отриманими за допомогою ШСЗ, проведено аналіз зміни запасів вологи в атмосфері та інтенсивності дощу.

Теоретично показано можливість використання сигналу підсвічування ГНСС для дистанційного зондування атмосферних неоднорідностей як природного так і штучного характеру, а також підстильних поверхонь [3, 4].

ВИСНОВКИ

Вивчення сезонних змін характеристик тропосфери для різних регіонів України дозволило встановити, що для коефіцієнта заломлення характерна наявність сильних добових і сезонних залежностей, обумовлених змінами температури, тиску й вологості. Показано, що взимку для всіх міст, незалежно від їхнього місцезнаходження, коефіцієнт заломлення тропосфери має значення близько 310 N-одиниць, тоді як влітку його максимальні значення залежать від місця розташування міста. Закони розподілу коефіцієнта заломлення відрізняються від стандартних гауссівських моделей і для їхнього опису можна використовувати напівмарківські вкладені процеси.

Запропоновано методику діагностики рефракційних властивостей тропосфери, яка базується на аналізі рівня й характеру поводження сигналу УКХ на заобрійних трасах. Сформульовано класифікаційні критерії для визначення типу тропосферної рефракції за поводженням прийнятого протягом доби сигналу. За результатами обробки систематичних вимірювань отримано дані про наявність різноманітних рефракційних ситуацій у різні сезони. Встановлено кореляцію рівня сонячної радіації з трендовими багаторічними змінами коефіцієнта заломлення тропосфери.

Запропоновано метод оцінки тропосферної рефракції над сушею з використанням радіосходів та заходів навігаційних супутників систем GPS і ГЛОНАСС. Показана наявність кореляційного зв'язку між кутами радіозаходу (сходу) супутника і коефіцієнтом заломлення (його градієнтом) у приповерхневому шарі. Запропоновано використовувати кути радіозаходів супутників ГНСС для діагностики дальності дії радіосистем, зокрема радіолокаційних, що дозволяє проводити діагностику дальності дії радіосистем без випромінювання.

Встановлено залежність рівня флуктуацій обчисленої псевдодальності та виміряної висоти від наявності на трасі поширення ГНСС-сигналу зон дощу.

Розроблені методики діагностики атмосферної рефракції та виявлення небезпечних метеоявищ з використанням випромінювання ГНСС можуть використовуватись для розширення функціональних можливостей приймачів ГНСС-сигналів та підвищення їхньої конкурентоспроможності.

Розроблена модель функції відображення зенітної тропосферної затримки, яка враховує рівень тропосферної рефракції. Її використання дозволяє знизити похибки визначення псевдовідстаней до супутників при малих кутах місця (до 2°) з 10 до 2 м. Модель може також використовуватись для вирішення зворотної задачі — оцінки тропосферної рефракції на трасі поширення за виміряними значеннями поправки псевдовідстані.

Сезонні та добові зміни коефіцієнта заломлення тропосфери під впливом сонячної радіації призводять до появи пов'язаних з ними сезонних та добових похибок вимірювання висоти та псевдовідстані за сигналами ГНСС.

Встановлено, що сучасні моделі атмосферних (тропосферних та іоносферних) зенітних затримок дозволяють лише частково компенсувати похибки визначення висоти та псевдовідстані, що потребує встановлення причин таких розбіжностей з експериментом та модернізації моделей атмосферних корекцій (тропосфери та іоносфери).

Запропоновано використовувати підсвічування об'єктів випромінюванням систем супутникової навігації для вирішення задач їхнього виявлення і визначення координат. Оцінено можливі дальності їхнього виявлення. Запропонований підхід відкриває нові можливості для створення системи глобального моніторингу та радіолокації з використанням випромінювань ГНСС.

Робота виконується відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр. та розпоряджень Президії НАН України № 56 від 01.02.13 р. та № 140 від 04.03.14 р.

- 1. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Луценко В. И. и др. Восстановление информационных параметров природных сред с использованием атомарных и WA-систем функций. Обзор. Часть І. Применение теории полумарковских полей и финитных функций для описания нестационарных процессов // Физ. основы приборостроения. 2014. **3**, № 2. С. 3—17.
- Кутуза Б. Г., Кравченко В. Ф., Луценко В. И. и др. Использование излучений ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва, 2014. Элект-

ронный ресурс [Режим доступа]: http://smiswww.iki. rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4381.

- 3. Лауш А. Г., Луценко В. И., Луценко И. В. и др. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации и дистанционного зондирования // 14-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): Матер. конф. — Севастополь, 2014. — С. 1149—1150
- 4. Лауш А. Г., Луценко В. И., Луценко И. В. и др. Освещение воздушной и надводной обстановки с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем // 5-й Междунар. Радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Междунар. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии»: сб. науч. тр. — Харьков, 2014. — Т. 1. — С. 45—48.
- 5. Левченко С. А. Луценко В. И., Луценко И. В. и др. Мониторинг атмосферы и поверхности океана при помощи приемников систем глобальной спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС // Science and echnology as a Basis of Modernization for Future Sustainable Development (SSF-2014): Proc. Int. Humboldt conf. — Minsk, 2014. — P. 26—30.
- 6. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов Д. О. Влияние метеообразований на изменение координат потребителей в ГНСС // 14-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): Матер. конф. Севастополь, 2014. С. 1125—1126.
- 7. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов Д. О. Диагностика атмосферы и подстилающей поверхности с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем // 14-а Укр. конф. з космічних досліджень: тези доп. —Ужгород, 2014. — С. 33.
- 8. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов Д. О. Обнаружение метеорологических образований при помощи систем глобальной навигации // 5-й Междунар. Радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Междунар. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии»: сб. научн. тр. — Харьков, 2014. — 1. — С. 207—210.
- 9. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., et al. Statistical model of the refractive index of the troposphere // Univ. J. Phys. and Appl. (UJPA). 2014. 2 (4). P. 206-212.
- Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O., et al. Simulation of the mapping function for calculation of troposheric zenith delay // Telecommunications and radio engineering. 2014. 73, N 5. P. 413–424.

Стаття надійшла до редакції 12.12.14

О. В. Кривенко¹, А. Г. Лауш², В. И. Луценко¹, И. В. Луценко¹, Д. О. Попов¹, И. В. Попов¹, А. В. Соболяк³

 ¹ Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков
 ² ООО «Навис-Украина», Харьков
 ³ Харьковское конструкторское бюро машиностроения им. А. А. Морозова, Харьков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ И ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ЦЕНТРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния солнечной радиации на сигналы телевизионных центров на загоризонтной трассе и сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Предложены новые способы и методики оценивания рефракционных свойств атмосферы и определения зон осадков. Разработан метод определения рефракционных свойств тропосферы с использованием углов прихода сигналов УКВ и ГНСС. Предложенные подходы позволят развить методы дистанционного зондирования и могут использоваться при создании системы глобального мониторинга Земли и атмосферы.

Ключевые слова: атмосферная рефракция, глобальные навигационные спутниковые системы, дистанционное

зондирование, опасные метеорологические явления, УКВ-сигналы, тропосфера.

O. V. Kryvenko¹, A. G. Laush², V. I. Lutsenko¹, I. V. Lutsenko¹, D. O. Popov¹, I. V. Popov¹, O. V. Sobolyak³

¹O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv ² «LLC Navis - Ukraine»

³ Kharkiv Morozov Machine Building Design Bureau

USE OF SATELLITE AND TV RADIATION FOR STUDY OF ATMOSPHERIC PROCESSES

The results of experimental studies of the effect of solar radiation on television centers signals in beyond-the-horizon track and signals of global navigation satellite systems (GNSS) are presented. New methods and techniques of estimating refractive properties of the atmosphere and determining areas of precipitation are offered. The method for determining the refractive properties of the troposphere using angles of arrival of VHF and GNSS signals is worked out. The proposed approach will permit to develop methods of remote sensing techniques, and it can be used in developing the system of global monitoring of the Earth and its atmosphere.

Key words: atmospheric refraction, global navigation satellite systems, remote sensing, dangerous meteorological phenomena, VHF signals, troposphere.

АПОСТОЛОВ Олександр Анатолійович — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — методи обробки даних дистанційного зондування Землі з метою дослідження природних ресурсів.

БАСАРАБ Руслан Михайлович — науковий співробітник відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — методи попередньої та тематичної обробки даних дистанційного зондування Землі (оптичних та радіолокаційних), попередня та тематична обробка даних КА ДЗЗ «Січ-2».

БІЛІНСЬКИЙ Андрій Іванович — провідний інженер відділу практичної астрономії Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету.

Напрям науки — космічні дослідження.

БЛАГОДИР Ярослав Тимофійович — керівник відділу практичної астрономії Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету.

Напрям науки — космічні дослідження.

БОВЧАЛЮК Андрій Павлович — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору та фізика атмосфери.

БРАЖЕНКО Анатолій Іванович — старший науковий співробітник Полтавської гравіметричної обсерваторії, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, фізика Сонця.

ВОВЧИК Єва Богданівна — провідний інженер відділу практичної астрономії Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічні дослідження.

ВОРОБЙОВА Тамара Василівна — провідний інженер відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України. Напрям науки — клітинна біологія, космічна біологія.

ГАЙДАК Андрій Хітабович — студент кафедри вірусології Навчально-наукового центру «Інститут біології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

ГАЛА Ігор Владиславович — аспірант кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — процеси в навколоземному космічному просторі.

ГРАХОВ Володимир Павлович — старший науковий співробітник відділу алелопатії, центр ВЕЖХ Національного ботанічного саду ім. М. М. Гришка Національної академії наук України.

Напрям науки — алелопатія рослин.

ДАНИЛЕВСЬКИЙ Василь Олексійович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору та фізика атмосфери.

ДЕ ВЕРА Жан-Поль — науковий співробітник Інституту планетарних досліджень Берлінської філії Німецького космічного агентства (ФРН).

Напрям науки — астробіологія.

ДЕМЕЦ Рене — головний спеціаліст Європейського центру космічних досліджень і технологій Європейського космічного агентства (Нідерланди).

Напрям науки — астробіологія.

ДОРОВСЬКИЙ Володимир Віталійович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, фізика Сонця.

ЄЛІСТРАТОВА Леся Олександрівна — науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук

Національної академії наук України», кандидат географічних наук.

Напрям науки — географія, кліматологія.

ЄПІШЕВ Віталій Петрович — керівник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету, доцент.

Напрям науки — космічні дослідження.

ЖИВОЛУБ Євген Леонідович — науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика процесів твердіння.

ЖУПАНОВ Іван Вікторович — аспірант відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України.

Напрям науки — клітинна біологія, морфологія та анатомія рослин.

ЗАЄЦЬ Ірина Євгеніївна — старший науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біохімія.

ІВАНОВ Юрій Стратонович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — поляриметрія, космічне приладобудування.

КАЛІНІЧЕНКО Микола Миколайович — завідувач відділу радіоастрономічної апаратури і методів спостережень Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, фізика міжпланетного середовища, методи високочутливих та завадостійких радіоастрономічних досліджень.

КАРА Ігор Володимирович — молодший науковий співробітник відділу космічних досліджень Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету».

Напрям науки — космічні дослідження.

КАТЬКОВА Олена Володимирівна — провідний інженер Інституту зоології ім. І. І. Шмальгаузена Національної академії наук України.

Напрям науки — біологічний експеримент.

КЛИМЕНКО Олена Миколаївна — провідний інженер відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України.

Напрям науки — клітинна біологія.

КЛИМЕНКО Юрій Олександрович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — теоретична фізика та фізика твердого стану, молекулярна електроніка, сенсорика, електричні властивості наноструктур та полімерів, космічне приладобудування.

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.

КОЗИРЄВ Євген Сергійович — науковий співробітник лабораторії навколоземної астрономії Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — космічні дослідження.

КОЗИРОВСЬКА Наталія Олексіївна — завідувач лабораторії Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

КОЛОТІЙ Андрій Всеволодович — старший науковий співробітник відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — системне адміністрування, мережеві технології, математичне моделювання, GRID-обчислення, прогнозування врожайності.

КОНОВАЛЕНКО Олександр Олександрович — академік Національної академії наук України, заступник директора з наукової роботи, завідувач відділення низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізикоматематичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, фізика міжзоряного середовища, атомна радіоспектроскопія.

КОРДЮМ Єлизавета Львівна — завідувач відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, доктор біологічних наук.

Напрям науки — клітинна біологія, космічна біологія.

КОШКІН Микола Іванович — заступник директора з наукової роботи, керівник відділу космічних досліджень Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерва-

торія Одеського національного університету», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічні дослідження.

КРАВЧУК Сергій Григорович — заступник директора з наукової роботи Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — астрофізика, космічні дослідження.

КРИВЕНКО Олена Владиславівна — науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — електродинаміка суцільних середовищ, діелектрометрія.

КУДАК Віктор І. — молодший науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрям науки — космічні дослідження.

КУЛІЧЕНКО Микола Олександрович — інженер-дослідник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — космічні дослідження.

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

Напрям науки — інтелектуальні методи та інформаційні технології обробки складних різнорідних даних на основі нейромережевого підходу до розпізнавання образів.

КУХАРЕНКО Ольга Євгенівна — молодший науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — мікробіологія.

ЛАВРЕНЮК Микола Сергійович — інженер-програміст відділу наук про мікрогравітацію Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — дистанційне зондування Землі, нейромережевий підхід до картографування земної поверхні з використанням супутникових зображень, тематична обробка супутникових зображень.

ЛАРІОНЧИК Валерій Миколайович — директор Закритого акціонерного товариства «НПП Техсіс».

Напрям науки — конструювання та побудова наукових приладів.

ЛАУШ Анатолій Григорович — Головний конструктор ТОВ «Навіс-Україна».

Напрям науки — глобальні навігаційні супутникові системи.

ЛЕВЧЕНКО Володимир Володимирович — старший науковий співробітник Інституту хімії високомолекулярних сполук Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика полімерів, електропровідні полімерні композити, нанонаповнювачі, термофізичні методи досліджень композиційних матеріалів.

ЛИТВИНЕНКО Леонід Миколайович — академік Національної академії наук України, директор Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — теорія дифракції та поширення електромагнітних хвиль в композитних і багатошарових періодичних структурах.

ЛИТВИНЕНКО Олег Олександрович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, фізика іоносферної плазми.

ЛУКЕНЮК Адольф Антонович — директор Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічне приладобудування.

ЛУЦЕНКО Владислав Іванович — старший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук. Академік Академії наук прикладної радіоелектроніки, лауреат премії Ради Міністрів СРСР в галузі радіоелектроніки, винахідник СРСР.

Напрям науки — дистанційне зондування.

ЛУЦЕНКО Ірина Владиславівна — науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — глобальні навігаційні супутникові системи, дистанційне зондування.

ЛЮБИЧ Ірина Володимирівна — старший науковий співробітник Державного міжвузівського центру «Оріон».

Напрям науки — космічні дослідження.

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 пре-

мій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

Напрям науки — географія, енергомасообмін в геосистемах, дистанційні дослідження природних ресурсів.

МАЖАЄВ Олександр Ернестович — інженер-дослідник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — космічні дослідження.

МАМУНЯ Євген Петрович — провідний науковий співробітник Інституту хімії високомолекулярних сполук Національної академії наук України, доктор фізикоматематичних наук, професор.

Напрям науки — дослідження структури, електричних, діелектричних, теплофізичних і механічних властивостей полімерів та композитних і нанокомпозитних полімерних матеріалів.

МАРТИНЮК-ЛОТОЦЬКИЙ Костянтин Павлович — інженер І категорії відділу практичної астрономії Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету.

Напрям науки — космічні дослідження.

МЕЛЬНИК Андрій Костянтинович — молодший науковий співробітник Інституту сорбції та проблем ендоекології Національної академії наук Україні.

Напрям науки — спектроскопія електронного парамагнітного резонансу.

МЕЛЬНИК Валентин Миколайович — завідувач відділу астрофізики Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, фізика Сонця.

МІЛІНЕВСЬКИЙ Геннадій Петрович — завідувач науково-дослідної лабораторії "Фізика космосу" кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, завідувач лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору та фізика атмосфери.

МІЩЕНКО Михайло Іванович — головний науковий співробітник Годдардівського інституту космічних досліджень НАСА (Нью-Йорк, США), доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика розсіяння електромагнітних хвиль, радіаційний перенос, дистанційне зондування, поляриметрія.

НЕДУХА Олена Макарівна — провідний науковий співробітник відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, доктор біологічних наук.

Напрям науки — клітинна біологія, космічна біологія.

НЕСТЕРЕНКО Ольга Миколаївна — молодший науковий співробітник Інституту зоології ім. І. І. Шмальгаузена Національної академії наук України.

Напрям науки — морфофункціональна характеристика і диференціювання остеогенних клітин в умовах зниження гравітаційного навантаження.

ОЛЬЯКМарина Ростиславівна — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — низькочастотна радіоастрономія, теорія поширення радіохвиль в магнітоактивній плазмі.

ОРЛОВСЬКА Ірина Вікторівна — інженер Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — екологія мікроорганізмів.

ПЕРЕПЕЧЕНКО Борис Іванович — завідувач конструкторської групи Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрям науки — конструювання наукових приладів.

ПОДОЛІЧ Ольга Валеріївна — науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

ПОПОВ Дмитро Олегович — аспірант Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України.

Напрям науки — глобальні навігаційні системи, дистанційне зондування.

ПОПОВ Ігор Володимирович — молодший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України.

Напрям науки — поширення радіохвиль, радіотехнічні системи.

ПРУЦКО Юлія В'ячеславівна — провідний інженер відділу дистанційних методів та перспективних приладів Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — моделювання роботи перспективних космічних пристроїв.

РЕББОУ Ельке — науковий співробітник Інституту планетарних досліджень Кельнської філії Німецького космічного агентства (ФРН).

Напрям науки — астробіологія.

РЕВА Олег Миколайович — професор Університету Преторії (Південна Африка), кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біоінформатика.

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

Напрям науки — радіаційна фізика.

РОДІОНОВА Наталія Василівна — завідувач відділу Інституту зоології ім. І. І. Шмальгаузена Національної академії наук України, академік Міжнародної Академії астронавтики, професор, доктор біологічних наук.

Напрям науки — клітинні механізми розвитку і ремоделювання кісткової тканини, гравітаційно-залежні перебудови в кістковому скелеті при дії факторів космічного польоту.

РОЗЕНБУШ Віра Калениківна — провідний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика комет, фізика атмосфер планет, поляриметрія.

РОМАНЮК Ярослав Орестович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічні дослідження, приладобудування.

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.

СИБІРЯКОВА Євгенія Сергіївна — науковий співробітник лабораторії навколоземної астрономії Науководослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — космічні дослідження.

СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович — завідувач лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — поляриметрія, космічне приладобудування.

СКАКУН Сергій Васильович — старший науковий співробітник Товариства з обмеженою відповідальністю «Інтеграція-Плюс», кандидат технічних наук, доцент.

Напрям науки — обробка даних дистанційного зондування Землі (оптичних та радіолокаційних), інтерферометрія, моделювання складних процесів, GRID-обчислення, Sensor Web, інтелектуальні методи обробки даних (нейронні мережі).

СКРИПЧЕНКО Олена Володимирівна — науковий співробітник Інституту зоології ім. І. І. Шмальгаузена Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — ультраструктура клітин строми кісткового мозку у різних класах наземних хребетних.

СОБОЛЯК Олександр Васильович — начальник відділу електрообладнання Харківського конструкторського бюро машинобудування ім. О. О. Морозова.

Напрям науки — системи діагностики, наукове приладобудування.

СОСОНКІН Михайло Григорович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічне приладобудування, фізика атмосфери.

ТЕРПАН Сергій Степанович — молодший науковий співробітник відділу космічних досліджень Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету».

Напрям науки — космічні дослідження.

ФЕДОРОВ Олег Павлович — директор Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, провідний науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент Національної академії наук України.

Напрям науки — космічні дослідження, фізика кристалізації.

ХІРУНЕНКО Людмила Іванівна — старший науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук України.

Напрям науки — фізика твердого тіла, радіаційна фізика.

ШАКУН Леонід Сергійович — науковий співробітник відділу космічних досліджень Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету».

Напрям науки — космічні дослідження.

ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович — завідувач кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — інтелектуальні обчислення, методи обробки супутникових даних, інформаційні технології, Grid-обчислення, розробка розподілених систем. ШИМКІВ Анатолій Павлович — науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — космічне приладобудування.

ШПИЛЬОВА Світлана Павлівна — старший науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — цитологія.

ШУЛЬГА Олександр Васильович — заступник директора з наукової роботи Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічні дослідження.

ЯЙЛИМОВ Богдан Ялкапович — молодший науковий співробітник відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — проблеми побудови сервіс-орієнтованих прикладних інформаційних систем, GRID-обчислення, теорія інформації, теоретичні основи програмування, системне адміністрування, математичне моделювання.

ЯЦЕНКО Віталій Олексійович — завідувач відділу дистанційних методів та перспективних приладів Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрям науки — космічне приладобудування, сенсорика, дистанційне зондування.

ЯЦКІВ Ярослав Степанович — член Президії Національної академії наук України, директор Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, президент Української астрономічної асоціації, доктор фізикоматематичних наук.

Напрям науки — астрономія, геодинаміка, космічні дослідження.

ЯЩУК Дар'я Юріївна — провідний інженер відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — дистанційне зондування Землі, нейромережевий підхід до картографування земної поверхні з використанням супутникових зображень.