

100 porta po

# **3MICT**

#### Астрономія й астрофізика

Пкуратов Ю. Г., Конованско С. О., бакаренко Б. Б., Станіславський О. О., Баннікова О. Ю., Кайдаш В. Г., Станкевич Д. Г., Корохін В. В., Ваврів Д. М., Галуш- ко В. Г., Єрін С. М., Бубнов І. М., Токарський П. Л., Ульянов О. М., Степкін С. В., Литвиненко Л. М., Яцків Я. С., Вайдін Г., Зарка Ф., Рукер Х. О. Українська місія на Місяць: цілі та корисне навантаження. Вавилова І. Б. Ефект гравітаційного червоного змі- щення: перевірки в наземних і космічних експери- ментах.	3	slavsky A. A., Bannik vich D. G., Korokhin Yerin S. N., Bubnov I. Stepkin S. V., Lytvyne Zarka P., Rucker H. How to and with what Vavilova I. B. Tests of space-born and groun
Космічна й атмосферна фізика		Space and Atmospher
<i>Черногор Л. Ф.</i> Физические эффекты румынского метеороида. 1	49	Chernogor L. F. Phys roid. 1.
Космічні матеріали та технології		Space Materials and
Элькади М. М., Хорольский М. С., Санин А. Ф. Нанотехно- логии — одно из перспективных направлений создания новых конструкционных эластомерных материалов	71	<i>Elkady M. M., Khoro</i> nologies — one of the of new elastomeric st
Історія космічних досліджень		History of Space Res
Світлої пам'яті першого космонавта України Леоніда Каденюка	76	In Memory of Leonid Ukraine
Наші автори	88	Our authors

© НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ, 2018 © ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ, 2018

## **CONTENTS**

### Astronomy and Astrophysics

Shkuratov Y. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stani- slavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stanke- vich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkin S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S., Videen G., Zarka P., Rucker H. O. Ukrainian mission to the Moon: How to and with what	3 31
Space and Atmospheric Physics	
Chernogor L. F. Physical effects of the romanian meteo- roid. 1	49
Space Materials and Technologies	
<i>Elkady M. M., Khorolskyi M. S., Sanin A. F.</i> Nanotechnologies — one of the future directions of the composing of new elastomeric structural materials	71
History of Space Research	
In Memory of Leonid Kadenyuk — the First Cosmonaut of Ukraine	76
Our authors	88

*На першій сторінці обкладинки* — колірна карта околиць кратера Брауде, як їх було видно з космічного апарата LRO. Дані взято із сайту http://target.lroc.asu.edu/q3 (див. статтю Ю. Г. Шкуратова та ін.)

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються 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 Веб-сайт: space-scitechnjournal.org.ua

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

Підписано до друку 23.03.2018. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 9,45. Обл.-вид. арк. 9,92. Тираж 101 прим. Зам. № 5203.

Оригінал-макет виготовлено і тираж віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01004

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

doi: https://doi.org/10.15407/knit2018.01.003

УДК 523.164.42

Ю. Г. Шкуратов<sup>1, 2</sup>, О. О. Коноваленко<sup>1</sup>, В. В. Захаренко<sup>1, 2</sup>, О. О. Станіславський<sup>1, 2</sup>, О. Ю. Баннікова<sup>1, 2</sup>, В. Г. Кайдаш<sup>2</sup>, Д. Г. Станкевич<sup>2</sup>, В. В. Корохін<sup>2</sup>, Д. М. Ваврів<sup>1</sup>, В. Г. Галушко<sup>1</sup>, С. М. Єрін<sup>1</sup>, І. М. Бубнов<sup>1</sup>, П. Л. Токарський<sup>1</sup>, О. М. Ульянов<sup>1</sup>, С. В. Степкін<sup>1</sup>, Л. М. Литвиненко<sup>1</sup>, Я. С. Яцків<sup>3</sup>, Г. Вайдін<sup>4</sup>, Ф. Зарка<sup>5</sup>, Х. О. Рукер<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків, Україна

<sup>2</sup> Інститут астрономії Національного університету імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

<sup>3</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

<sup>4</sup> Space Science Institute, Boulder, USA

<sup>5</sup> LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, Université Paris-Diderot, Paris, France

<sup>6</sup> Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

## УКРАЇНСЬКА МІСІЯ НА МІСЯЦЬ: ЦІЛІ ТА КОРИСНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

Науково-технічний потенціал України у співпраці з іншими зацікавленими країнами дозволяє підготувати космічну місію з корисним навантаженням для дослідження Місяця. У статті розглядаються подробиці такої місії, яка складається з двох корисних частин: 1) орбітальне дослідження з витягнутої орбіти з перицентром над північним полюсом (100 км над поверхнею) і апоцентром над південним полюсом (висота приблизно 3000 км); 2) дослідження за допомогою посадкового модуля на зворотному боці Місяця поблизу південного полюса в околицях кратера Брауде. Посадковий модуль, що має у своєму складі п'ять дипольних антен, дозволяє виконати різноманітні радіоастрономічні спостереження від сотень кілогерц до 40 МГц. Панорамна камера посадкового модуля, яка буде обладнана колірними та поляризаційними фільтрами, забезпечить важливі спостереження горизонту з метою досліджень сяйва, викликаного ефектом електростатичної левітації місячного пилу. Для картування структурних та мінералогічних характеристик молодих поверхневих утворень пропонується камера HiRes, що працює у двох спектральних смугах. Триміліметровий радар у режимі бокового огляду дасть змогу картувати не тільки радіояскравість поверхні, що характеризує його шорсткість, але й поліпшити місячну топографічну модель.

**Ключові слова:** радіовипромінювання астрофізичних об'єктів, низькочастотна радіоастрономія, космічні місії, місячний пил, сяйво горизонту поблизу полюса, мода розтягування, зображення фазового відношення, карта радіояскравості поверхні.

## ВСТУП

Результати, отримані за допомогою роботизованих космічних місій, стимулювали подальший інтерес до вивчення Місяця. Після вражаючих місячних досліджень, проведених зусиллями США (КА «Lunar Reconnaissance Orbiter» (LRO) [54]), Індії («Chandrayaan-1» [43]), Китаю (від «ChangE-1» [101] до «ChangE-3», включаючи «Yutu lander», [48, 122]) та Японії («Kaguya» (SELENA) [90]), ці країни, а також Росія [71] та Республіка Корея [46] мають амбітні плани продовжувати дослідження Місяця в широкому науковому контексті. Головною метою цих планів на період до 2040 р. є детальні дослідження

<sup>©</sup> Ю. Г. ШКУРАТОВ, О. О. КОНОВАЛЕНКО, В. В. ЗАХАРЕНКО, О. О. СТАНІСЛАВСЬКИЙ, О. Ю. БАННІКОВА, В. Г. КАЙДАШ, Д. Г. СТАНКЕВИЧ, В. В. КОРОХІН, Д. М. ВАВРІВ, В. Г. ГАЛУШКО, С. М. ЄРІН, І. М. БУБНОВ, П. Л. ТОКАРСЬКИЙ, О. М. УЛЬЯНОВ, С. В. СТЕПКІН, Л. М. ЛИТВИНЕНКО, Я. С. ЯЦКІВ, Г. ВАЙДІН, Ф. ЗАРКА, Х. О. РУКЕР, 2018

Місяця та його середовища за допомогою зондів, використання Місяця як місця для всехвильових астрономічних спостережень та початок нових пілотованих місій, включаючи створення заселених місячних баз. Такі плани були намічені багато років тому [107] і постійно обговорюються спеціалістами [85]. Астронавт-геолог корабля «Аполлон-17» Шмітт запропонував програму [85] повернення людей до Місяця, що базується на залученні приватних інвесторів, які сприятимуть використанню Місяця для науки і виробництва, зокрема для видобування ізотопу <sup>3</sup>Не, який є бажаним паливом для термоядерних реакторів [109, 111].

Місяць зберігає сліди ранньої еволюції Сонячної системи. Місячний реголіт є важливим джерелом інформації про міжпланетну речовину, сонячний вітер та галактичні космічні промені. Таким чином, необхідні комплексні дослідження місячної поверхні, включаючи участь космонавтів та робототехнічних транспортних засобів, а також дослідження за допомогою дистанційного зондування з місячної орбіти. Наприклад, є необхідним подальше удосконалення та розробка методів картування складових та структурних параметрів Місяця. Важливим завданням є, наприклад, картування вмісту FeO і ступеня зрілості місячного реголіту з просторовою роздільною здатністю понад 10 м з використанням методу Lucey [14, 65] або альтернативних підходів [77]. Більш широке застосування методу фазового співвідношення до зображень високого розділення [51, 88] необхідні для кращого розуміння процесів оновлення на поверхні Місяця [91, 93]. Суттєвою потребою є вивчення розподілу сполук OH/H<sub>2</sub>O [21, 23, 76, 102].

Місячна поверхня є природною платформою для досліджень в області астрономії та особливо радіоастрономії [16, 21, 23—25, 47, 70]. Незначна потужність місячної іоносфери дозволяє провадити радіоастрономічні вимірювання на дуже низьких частотах, які неможливі з поверхні Землі. Через екранування земних радіоперешкод і значного випромінювання від блискавок і сяйв, а також від Сонця під час місячної ночі, зворотна сторона Місяця представляє особливий інтерес для низькочастотних радіоастрономічних вимірювань. Також потрібно зазначити, що зворотна сторона Місяця ніколи не вивчалася з використанням посадкових модулів, оскільки для зв'язку з Землею потрібні додаткові космічні апарати за межами Місяця для передачі сигналу. Лише два супутники, запущені майже півстоліття тому, здійснили низькочастотні радіовимірювання в діапазоні частот від 0.02 до 13.1 МГц [8, 49].

Україна брала участь в радянській пілотованій місячній програмі, яку, на жаль, скасували, коли СРСР програв місячну гонку [20]. Україна виробляла модулі для місячного посадкового комплексу (проект NI-L3). Зокрема, ракета стадії «Блок-D», яка могла б використовуватися L3-космічним апаратом під час виведення на орбіту та спуску на поверхню, була успішно випробувана в 1960—1970-х рр. («Космос-379», «Космос-382», «Космос-398» та «Космос-434»). На даний момент Україна має науково-технічний потенціал для участі у перспективних міжнародних місячних проектах, а також для реалізації власних місячних місій. На початку 2000-х років було розглянуто проект «Укрселена» для дослідження Місяця, який з ряду причин не було реалізовано. До проекту, запропонованого Ю. Г. Шкуратовим та ін. [6, 89] також був включений штучний супутник для отримання поляриметричних зображень поверхні Місяця. Тепер цю можливість орбітальної місячної поляриметрії включено до корейського апарата «Korea Pathfinder Lunar Orbiter» (KPLO) [46], який може бути запущений протягом найближчих 3-4 років.

В цій роботі ми обговорюємо розробку проекту «Місячний штучний супутник», запропонований Ю. Г. Шкуратовим із співробітниками [6, 89], який передбачає подвійну місію на Місяць та може бути реалізований протягом кількох років у співпраці з іншими країнами. Місія включає в себе полярний орбітальний та посадковий апарати, які будуть оснащені недавно розробленими та випробуваними складними антенами [58] для радіоастрономічних досліджень космічних об'єктів із зворотного боку Місяця в діапазоні низьких частот. Це дозволить зробити унікальні спостереження дальнього космосу, які неможливі з поверхні Землі або навіть зі сторони Місяця, зверненої до Землі. Зазначимо, що наша місія, запропонована тут, є простішою, ніж «Фарсайд Експлорер» [70], метою якої є розміщення двох роботів на борту місячного посадкового модуля для довгохвильових радіоастрономічних вимірювань та розташування інструментального ретрансляційного супутника на гало-орбіті у точці Лагранжа L2 системи «Земля — Місяць».

Слід зазначити, що Україна має значний досвід розробок в низькочастотній радіоастрономії завдяки своєму комплексному підходу до таких досліджень. Він включає в себе розробку радіотелескопа оптимального типу в заданому діапазоні частот для різних радіоастрономічних задач, які вимагають довгострокових високоточних спостережень. Досвід конструювання найбільшого у світі радіотелескопа УТР-2 [15], сигнальних трактів з максимально можливим діапазоном лінійності і чутливості [1, 7], приймального обладнання [83, 108, 115, 118] призвів до розробки концепції та побудови субграток радіотелескопа ГУРТ [3, 55, 60]. Розроблені елемент антенної гратки [29, 104] та секція радіотелескопа [61] мають найкращий широкосмуговий діапазон при максимальній чутливості та достатній лінійності для низькочастотних спостережень у порівнянні з іншими радіотелескопами (наприклад LOFAR i LWA). Спостереження з однією секцією ГУРТ показали, що широкий спектр радіоастрономічних задач, який зазвичай вирішується за допомогою великих низькочастотних радіотелескопів [60, 116], можна вирішити за допомогою граток з меншою ефективною площею, але з вищою чутливістю та ширшим діапазоном частот елемента гратки і системи в цілому. У цьому проекті ми пропонуємо антену для низькочастотного місячного радіотелескопа, яка базується на нововведеннях, впроваджених для високоефективної системи ГУРТ.

## ΜΕΤΑ ΜΙCΙΪ

Подвійна місячна місія тривалістю один рік має на меті вивчення Місяця та навколомісячного простору, а також встановлення та обслугову-



*Рис.* 1. Кратер Брауде, як його було видно з космічного апарата «Лунар Орбітер-4». Стрілка показує можливе місце посадки модуля з радіоастрономічною антеною

вання радіоастрономічних антен для виконання унікальних спостережень тіл Сонячної системи та Всесвіту. Космічний апарат фактично складатиметься з двох блоків (модулів) — орбітального та місячного, які живляться від сонячних батарей. Обидва модулі можуть бути запущені одним носієм, при цьому посадковий апарат буде мати зв'язок з центром управління польотом через орбітальний ретрансляційний модуль. Було б раціонально обладнати орбітальний модуль антенами для передачі сигналу на Землю. Спускний апарат буде мати зв'язкові та радіоастрономічні антени.

Посадка радіоастрономічного модуля передбачається на зворотній стороні Місяця поблизу південного полюса. Місцем посадки можуть бути околиці кратера Брауде, розташованого на  $-81.8^{\circ}$  широти та 157.8° довготи. Кратер названо на честь українського вченого Семена Брауде, який є одним із засновників школи низькочастотної радіоастрономії та піонером в цій галузі не тільки в Україні, а й у світі (див. рис. 1).

Передбачається, що радіоастрономічний модуль виконає м'яку посадку. Основними корисними навантаженнями модуля будуть п'ять чутливих радіоастрономічних антен, обладнання для вимірювання характеристик плазми на по-



*Рис.* 2. Модель посадкового модуля з центральною радіоастрономічною антеною, яка працює разом з чотирма додатковими перехрещено-дипольними елементами типу ГУРТ (поза рамкою). Максимальний розмір диполя становить близько 1.5...2 м

верхні Місяця, а також панорамні камери для виявлення та спостереження хмар левітуючого пилу поблизу місячного термінатора біля місячного південного полюса. Місце для посадки повинно лежати на підвищеній ділянці, як показано на рис. 1, щоб мати надійний огляд місячного горизонту. Хоча кратер Брауде розташований поруч із полюсом, зміна відстані від посадкового майданчика до Землі коливається приблизно від 300 до 900 км в залежності від параметрів лібрації Місяця. Цього повинно бути достатньо для адекватного екранування радіоперешкод із Землі. Близькість до полюса забезпечує зв'язок із ретрансляційним супутником навіть у тому випадку, коли площина його орбіти перпендикулярна до лінії між центрами Землі та Місяця.

Посадковий модуль буде обладнано п'ятьма радіоастрономічними антенами, одна з яких буде встановлена на верхній частині посадкового модуля (див. рис. 2), а інші — на кінцях чотирьох штанг довжиною близько 4 м, відкинутих у різні боки. Ці антени утворюватимуть на поверхні Місяця хрестоподібну антенну решітку, що матиме ефективну площу, сумірну з площею субрешітки радіотелескопа ГУРТ. Використання решітки замість однієї антени дозволить помітно збільшити чутливість й роздільну здатність радіотелескопа та підвищити його надійність.

Є кілька можливостей розмістити ретрансляційний орбітальний модуль в околицях Місяця. Одним із варіантів є розташування супутника на гало-орбіті з центром поблизу точки Лагранжа L2 [22, 70]. У цьому випадку супутник завжди бачить Землю та зворотну сторону Місяця, тобто посадковий модуль буде постійно видно, що є великою перевагою. На жаль, точка L2 є гравітаційно нестійкою [44], і орбіта ретрансляційного супутника вимагає частої корекції. Ми вивчили



*Рис. 3.* Орбіта ретрансляційного супутника за 5 год його руху та її вигляд з місця посадки. Штрихова крива — орбіта після 150 обертів



**Рис. 4.** Відхилення параметрів орбіти супутника протягом 1 міс.: a — нахилу i,  $\delta$  — основної півосі a, e — ексцентриситету e орбіти (тут  $a_0$  та  $e_0$  —початкові значення основної півосі та ексцентриситету)

деякі гало-орбіти в рамках вирішення обмеженої задачі трьох тіл «Земля — Місяць — супутник». Як правило, орбіти з умовним радіусом близько 20 000 км на відстані від Землі 450 000 км мають орбітальний період приблизно 15 діб і вимагають кількаразового виправлення за один оберт. Для цього необхідне не лише споживання великої кількості палива, але й знання параметрів позиціонування космічного апарата у космосі з дуже високою точністю. Слід також зазначити, що точка L2 розташована на значній відстані від Місяця (≈64500 км), і тому дослідження місячної поверхні з цієї точки є дуже проблематичними.

Для успішної низьковитратної взаємодії з посадковим модулем може бути використано квазіпостійний зв'язок. Набагато простіше розташувати орбітальний модуль на навколомісячній еліптичній орбіті, з якої він може зв'язуватися з посадковим модулем протягом значного періоду (рис. 3). Наприклад, така полярна орбіта може мати апоцентр 5000 км і перицентр, який може забезпечити орбіту висотою близько 100 км над північним полюсом Місяця. У цьому випадку орбітальний період становить близько 5 год. Зазначимо, що така орбіта набагато стабільніша від розглянутих раніше. Це видно з рис. 3, де показано початкову орбіту (суцільна лінія) та орбіту після 150 обертів (штрихова лінія), що проходять поблизу Місяця.

На рис. 4 показано дрейф орбітальних параметрів протягом місяця. Спостерігаються невеликі відхилення від точної полярної орбіти з періодом один місяць. Те ж саме спостерігається і для варіацій основної півосі орбіти. Як видно, лише ексцентриситет з часом систематично збільшується. Цього цілком достатньо для однієї корекції орбіти на місяць. Слід зазначити, що значення всіх параметрів, представлених на рис. 4, є моментальними. Строго кажучи, завдяки впливу Землі та інших чинників ця орбіта не є еліптичною та навіть не є замкнутою; рис. 3 приблизно відображає те, як виглядає орбіта у відповідній задачі двох тіл.

## ПОСАДКОВИЙ МОДУЛЬ

Головне наукове завдання посадкового модуля це радіоастрономічні вимірювання та дослідження, що недоступні наземним телескопам та білыш раннім космічним місіям. Ці дослідження будуть виконуватися за допомогою п'яти антен, що на низьких частотах мають ефективну площу порядку декількох сотень квадратних метрів. Запропоновано широкий спектр досліджень від радіовипромінювань планет та Сонця до космологічних радіоліній. Радіоастрономічна антена на зворотній стороні Місяця у комбінації з наземними антенами, наприклад радіотелескопами УТР-2 та/або ГУРТ (Харків, Україна), може бути використана для радіоінтерферометричних досліджень яскравих космічних джерел з вико-



**Рис. 5.** Інтенсивність *F* планетарного та сонячного радіовипромінювання на поверхні Місяця у порівнянні з інтенсивністю галактичного фону, зареєстрованою однією дипольною антеною (рисунок з роботи [70])

ристанням рекордно довгої бази (400000 км). Також передбачаються дослідження для покращення та оптимізації таких вимірювань. До початку регулярних радіоастрономічних спостережень необхідно знайти відповіді на декілька питань, наприклад: 1) наскільки добре завади від Землі екрануються матеріалом місячної кори у місці посадки; 2) який внесок робить дифракція довгих хвиль від Землі, включаючи кілометрове випромінювання полярних сяйв у даному місці; 3) як низькочастотні радіохвилі поширюються через плазму, що оточує Місяць. Для дослідження цих проблем є сенс обладнати орбітальний модуль такими ж антенами, як і на посадковому модулі.

Посадковий модуль також може бути обладнаний панорамною камерою, що забезпечить спостереження ефекту левітації пилу біля полярного термінатора, та аналізаторами плазми для дослідження параметрів місцевої плазми (магнітометри, електрометри) в залежності від положення термінатора та ефектів хвоста магнітосфери Землі. Далі ми розглядаємо декілька задач, які можна вирішувати з використанням низькочастотних антен та вимірювачів ефекту левітації. Радіоастрономія. Головна проблема для наземної радіоастрономії — це високий рівень штучних радіозавад (від радіостанцій та індустріального характеру), які зазвичай у мільярди разів перевищують сигнали від космічних радіоджерел. Для радіотелескопа на Місяці земна іоносфера стає в нагоді як природний екран низькочастотних радіозавад з Землі. Це проявлятиметься на частотах до 10 МГц, а на вищих частотах завади будуть екрануватися вже самим Місяцем. Однак є інші типи низькочастотного радіовипромінювання від Землі — завади природного характеру.

На рис. 5 показано рівні сонячного та планетарного радіовипромінювання на поверхні Місяця у порівнянні з рівнем галактичного фону, виміряного за допомогою однієї дипольної антени [70]. Як неважко помітити, в діапазоні 0.1...1.0 МГц кілометрове випромінювання полярних сяйв (КВПС) може унеможливити навіть вимірювання сонячних сплесків. Ще одним фактором, що ускладнює спостереження на Місяці, є грозова активність на Землі. Таким чином, екранування Місяцем КВПС та грозового випромінювання дозволить значно покращити якість спостережень та вимірювань характеристик усіх космічних джерел. Після усунення чи значного ослаблення завад від Землі галактичний фон залишається головною проблемою радіоастрономічних спостережень спорадичних та одноразових подій зі зворотного боку Місяця. Такі події здебільшого пов'язані з Сонцем та Юпітером і мають дуже широкий діапазон інтенсивностей.

Сонце. Наземні спостереження сонячного радіовипромінювання до частоти іоносферного екранування дають можливість досліджувати процеси на висотах до  $3.5R_S$ , де  $R_S$  — радіус Сонця. У роботах [3, 58] розглядається приклад ефективної субгратки ГУРТ та навіть одного диполя [95]. Рис. 6 демонструє динамічний спектр серії сонячних дрейфуючих пар, отриманий 12 липня 2017 р. за допомогою північного плеча радіотелескопа УТР-2 (720 лінійних диполів), субгратки ГУРТ (25 активних крос-диполів) та одиничного крос-диполя ГУРТ. Як видно, антени типу ГУРТ дуже ефективні та найкраще підходять для таких спостережень на поверхні Місяця. Низькочастотні дослідження різноманітних типів сонячного радіовипромінювання (сплески II, III, IV типів, файбер-сплески, дрейфуючі пари) дозволяють проводити дослідження плазми на висотах, недосяжних для інших методів (4...6) R<sub>5</sub> та дозволяють вивчати такі джерела випромінювання, як промені високоенергетичних частинок, ударні хвилі та корональні викиди мас (КВМ). Наприклад, з'являється можливість спостереження корональних арок, що досягають цих висот. Температура плазми у таких арках була знайдена шляхом аналізу часфової затримки у радіовипромінюванні першої та другої гармонік U-сплеску (на частотах 25 та 50 МГц відповідно) при спостереженнях на радіотелескопі ГУРТ [2]. Актуальним науковим питанням залишається джерело сплесків IV типу. Зараз розглядаються дві можливі версії: КВМ, які можуть викликати перебої у глобальних мережах живлення та комунікацій на Землі, або високі корональні арки, що не становлять загрози для людства. У останньому випадку очікується, що тонка структура сплесків IV типу буде подібною до U- або J-сплесків. Через великі розміри цих арок випромінювання відбувається на низькій частоті та з малою інтенсивністю, що робить неможливим спостереження цих U- та J-сплесків за допомогою наземних радіотелескопів через іоносферну межу та/або сильні низькочастотні радіозавади. Таким чином, тільки місячний радіотелескоп може допомогти знайти відповідь на питання про джерело випромінювання. Якщо обидва вищезгадані механізми є можливими, радіотелескоп на поверхні Місяця може дозволити відрізнити КВМ від інших проявів сплесків IV типу.

Юпітер та Сатурн. Юпітеріанське низькочастотне випромінювання містить у собі ознаки, притаманні різноманітним фізичним об'єктам та умовам генерації. Найцікавіші події — шторми коротких S-сплесків — пов'язані зі складною взаємодією магнітного поля Юпітера зі струмами між супутниками та полюсами планети. Протягом довгого часу науковці пов'язували короткі S-сплески виключно із супутником Io. Зовсім недавно у записах довготривалих спостережень, що проводилися наземними радіо-



*Рис. 6.* Динамічні спектри послідовності сонячних сплесків типу «дрейфуючі пари», отримані 12 липня 2017 р. за допомогою північного плеча УТР-2 (720 диполів), субгратки ГУРТ (25 активних диполів) та одним диполем ГУРТ

телескопами та космічними місіями, було знайдено також декаметрове радіовипромінювання, спричинене Європою та Ганімедом [64]. Це відкриття суттєво змінює модель генерації радіовипромінювання, тому що тепер у моделі потрібно враховувати ефекти розповсюдження та взаємодії струмових трубок від різних супутників Юпітера. У зв'язку з цим ми бачимо нові спроби пояснити різні швидкості дрейфу S-сплесків [84], так звані «сплески поглинання» [62], та інші модуляційні ефекти. Варто зазначити, що відкриття нових типів юпітеріанського радіовипромінювання було здійснено не завдяки унікальним технічним характеристикам радіотелескопів, а дякуючи довготривалим спостереженням, якідопомогливстановитивзаємозалежність між повторюваністю сплесків та орбітальними періодами обертання планетарних супутників. Подальший розвиток цього підходу ідеально збігається з можливостями малорозмірного радіотелескопа на Місяці.

Блискавки в атмосфері Сатурна були відкриті космічним апаратом «Вояджер» у 1980 р. Тільки в 2006 р. на УТР-2 були надійно зафіксовані сигнали, подібні до радіовипромінювання сатурніанських блискавок. Доказ того, що отримані наземним радіотелескопом сигнали породжуються блискавками в атмосфері Сатурна, було отримано завдяки синхронним спостереженням радіотелескопа УТР-2 та місії «Кассіні/RPWS» [116, 117]. Відкриття тонкої часової структури блискавок [4, 5] дозволило знайти щільність потоків найпотужніших сплесків тривалістю 30...300 мкс з інтенсивністю 4000...5000 Ян (1 Ян =  $10^{-26}$  Вт·м<sup>-2</sup>Гц<sup>-1</sup>) та дослідити спектр блискавок. До того ж на низьких частотах (6 МГц) інтенсивність випромінювання блискавок підвищується. Це дозволяє досліджувати сплески навіть з однієї субрешітки ГУРТ, а значить і з місячного радіотелескопа, який пропонується.

Пульсари. Мала просторова роздільна здатність малої антенної решітки не є перешкодою для детектування радіовипромінювання пульсарів. Уточнені оцінки міри дисперсії для найближчих пульсарів [119] дозволяють виявити десятки пульсарів за допомогою субрешітки ГУРТ [58, 115] або запропонованого місячного радіотелескопа. Як мінімум декілька задач для низькочастотних досліджень таким радіотелескопом можна сформулювати вже зараз. Перш за все це оцінки середньої спектральної щільності та довготривалі флуктуації пульсуючого компонента у всьому робочому діапазоні частот радіотелескопа. Так само, як для аномально інтенсивних поодиноких імпульсів на низьких частотах [106], зміни у спектрі та інтенсивності радіовипромінювання пульсарів на часових масштабах від хвилин до років є дуже цікавими [11]. Ще одна актуальна проблема — це аналіз довгострокових флуктуацій дисперсії для вивчення мерехтінь у міжзоряному просторі. У роботі [3] показано, що роздільна здатність по часу 1 мкс забезпечує точність визначення міри дисперсії у  $10^{-5}...10^{-6}$  пк·см<sup>-3</sup> у діапазоні частот 10...40 МГц, яка є достатньою для досліджень не тільки міжзоряної, але й міжпланетної плазми. Такі значення часової роздільної здатності є прийнятними, тому що вони забезпечують дослідження розсіювання у низькочастотному діапазоні для найближчих пульсарів [105].

Радіорекомбінаційні лінії. Радіорекомбінаційні лінії високозбуджених атомів вуглецю у міжзоряному середовищі, які були відкриті 40 років тому за допомогою радіотелескопа УТР-2 у декаметровому діапазоні хвиль, дали новий метод дослідження холодної частково іонізованої космічної плазми. Це стало можливим завдяки точному визначенню фундаментальних характеристик середовища: температури, шільності, тиску, променевої швидкості, ступеня іонізації, механізмів іонізації та рекомбінації та іншим [56, 57]. Детектування дуже високих рівнів рідбергівських атомів до головного квантового числа 1030 у діапазоні 12...30 МГц дуже важливе як для астрофізики, так і для фізики в цілому [36, 99, 110]. У роботі [3] було оцінено інтенсивність радіорекомбінаційних ліній вуглецю для джерела Кассіопея Аз використанням радіотелескопів УТР-2 та субрешіток ГУРТ. У діапазоні 8...40 МГц лежить більш ніж 300 ліній з головними квантовими числами у діапазоні від 550 до 900. Велика кількість ліній, що одночасно спостерігаються, дає можливість досягти унікальної чутливості вимірювань. Таким чином, запропонований місячний радіотелескоп дозволяє виконати пошуки ліній вуглецю та водню у різноманітних регіонах нашої Галактики.

Космологічні радіолінії. Також є космологічний аспект радіоастрономії зі зворотного боку Місяця. Матерія на ранніх стадіях Всесвіту складалася з високоіонізованих атомів водню (протонів). Це був газ, який охолоджувався завдяки розширенню Всесвіту, що призводило до рекомбінації протонів та електронів і утворення нейтрального водню. Водень має заборонену лінію, спричинену взаємодією магнітних моментів електрона і протона в атомі водню. Коли відбувається спонтанна зміна орієнтації моменту електрона, атом випромінює квант електромагнітної енергії з довжиною хвилі 21.1 см (частота близько 1420 МГц). Паралельно з випромінюванням відбувається й процес збудження атомів водню, наприклад оптичними фотонами або у результаті зіткнень. Водень залишався нейтральним протягом темних віків до форму-

вання перших іонізуючих астрономічних джерел: масивних зір, галактик, квазарів, а також надщільних регіонів за рахунок гравітаційного колапсу. На даний час вважається, що ці віки тривали між 380 тис. та 150 млн років після Великого вибуху [33, 79]. Ця епоха відповідає високим значенням швидкості розширення Всесвіту v, яку можна оцінити за допомогою рівняння  $v = c [(1 + z)^2 - 1]/[(1 + z)^2 + 1], \text{ de } z = (\lambda_0 - \lambda)/\lambda,$  $\lambda_0$  та  $\lambda$  — це довжини хвиль з червоним зміщенням та без нього відповідно. Параметр червоного зміщення z реліктового випромінювання має значення близько 1000, тоді коли для лінії Н І він оцінюється у z > 100. На ранніх стадіях існування Всесвіту процес нагрівання та іонізації первинної речовини (переважно водню) може проходити повторно, викликаючи появу ліній поглинання нейтрального водню для різних *z*. Теоретичні дослідження [33] показують, що можливо є як мінімум три лінії поглинання Н І, зміщені на частоти 20, 50 та 150 МГц. Незважаючи на те що інтенсивності цих ліній очікуються дуже малими, їхнє виявлення буде дуже важливим з наукової точки зору [3].

**Левітація пилу.** Астронавти місії «Аполлон» та посадкові апарати, що перебували у цій місії, спостерігали свічення на горизонті біля областей термінатора [35, 68, 81]. Цей ефект викликано левітацією часток пилу над термінатором. Левітація викликана електростатичними зарядами на поверхні Місяця. Цей процес викликає появу середовища літаючих частинок з щільністю, яка у 10<sup>7</sup> разів більша, ніж щільність середовища при метеоритному бомбардуванні [32]. Неочікувано яскраве нічне небо спостерігалось з радянського апарата «Луноход-2» [87]. Свічення на горизонті спостерігалося також камерою системи орієнтації по зірках КА «Клементіна» [123].

Тіло, занурене у плазму сонячного вітру, отримує негативний заряд завдяки більшим електронним швидкостям: що більша швидкість, то більша частота зіткнень електронів з тілом. Поверхня Місяця піддається різним ефектам заряджання, зв'язаним з сонячним випромінюванням та зарядженими частинками у сонячному вітрі. Зокрема вважається, що пил набуває заря-



*Рис.* 7. Мікрофотографії часток та функція розподілу *f* (*d*) частинок надтонких фракцій з місячних зразків 10084 («Аполлон-11») та 70051 («Аполлон-17») за даними [63, 73]

ду завдяки ефекту фотоемісії, що продукується сонячним випромінюванням в ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах протягом місячного дня. Фотоелектрони покидають поверхню Місяця, що викликає позитивний заряд на денній стороні до декількох вольт. Так, випромінювання спричиняє позитивний електричний заряд пилових частинок реголіту діаметром декілька десятків мікронів.

На рис. 7 наведено мікрофотографії таких частинок та розподіл частинок за розміром найдрібніших фракцій місячних зразків 10084 та 70051 [63, 73] місій «Аполлон-11» та «Аполлон-17» відповідно. Обидва ці зразки не більші за 0.3 мкм. Частинки місячного пилу мають різну форму, та опис розсіювання світла на таких частинках потребує більш складних підходів, ніж теорія Мі [74, 75, 124—126]. Частинки пилу можуть відігравати значну роль у виникненні альбедних структур місячних вихорів (свірлів) [34], подібних утворенню Reiner Gamma [78, 98].

Якщо такі неправильні частинки подолають адгезію та гравітаційні сили, вони можуть злітати на певну висоту. Протягом місячної ночі значущим іонізаційним фактором є тільки плазма сонячного вітру, що забезпечує негативний заряд до 100 В [43, 68, 100]. У окремих місцях негативний та позитивний поверхневий заряд може сягати кількох кіловольт. Ці механізми роблять свій внесок до руху частинок пилу, що постійно підіймаються та падають на місячну поверхню, динамічно створюючи розріджену пилову атмосферу або пилову плазму [80].



*Рис. 8.* Свічення пилу на західному горизонті, зареєстроване камерою «Сервейор-7»: *а*, *б* — відповідно через 15 і 90 хв після заходу Сонця (дані [72])

На місячному термінаторі повинні спостерігатися значні горизонтальні електричні поля, які могли б призводити до горизонтального переносу місячного пилу. Полюси Місяця представляють найбільший інтерес, адже вони постійно знаходяться в зоні термінатора. У постійно затінених районах частинки пилу можуть накопичуватися, формуючи гладкі поверхні з незвичними характеристиками. Така поверхня скоріш за все має більше, ніж навколишні області, лідарне альбедо завдяки меншому розміру пилових частинок. Матеріал таких пилових частинок під максимальною дією протонів сонячного вітру також може генерувати коливальну ІЧ-смугу сполук OH/H<sub>2</sub>O [97].

Місячне середовище з пилу та плазми досліджене дуже слабо. Посадковий модуль може бути споряджено панорамною камерою для спостережень горизонту під час сходу та заходу Сонця, як це було зроблено на КА «Сервейор-5...-7» півстоліття тому [35]. На рис. 8 показано фотографії свічення на горизонті, отримані за допомогою камер апарата «Сервейор-7» 23 січня 1968 р. Добре видно сонячну підсвітку пилових шарів уздовж західного горизонту після заходу Сонця. Це свідчить про те, що буде дуже корисним обладнати посадковий модуль відповідною панорамною камерою. Дослідження свічень на горизонті біля південного полюса Місяця відкриває унікальні можливості для оцінки характеристик частинок, що левітують, та плазми сонячного вітру. Цей експеримент стане значно досконалішим, якщо обладнати камеру поляризаційними та колірними фільтрами. Зокрема, це може дозволити більш надійно оцінювати середній розмір частинок пилу, що левітують.

## ОРБІТАЛЬНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ

Супутниковий модуль призначено для вивчення місячної поверхні з еліптичної орбіти і забезпечення зв'язку посадкового модуля з Землею. Розглянемо три основні експерименти, які можуть бути виконані за допомогою обладнання на борту супутника, який також розглядається в якості ретранслятора для посадкового модуля на зворотному боці Місяця. Відповідне корисне навантаження складається із 3-мм радара, ІЧ-спектрометра для діапазону довжин хвиль від 1 до 5 мкм і камери НіRes для вивчення молодих місячних ділянок поверхні з використанням методу фазових відношень.

3-мм радар. За допомогою методів оптичного та близького інфрачервоного дистанційного зондування з використанням космічних апаратів отримано величезну кількість даних з високим просторовим розділенням. Однак ці дані містять інформацію лише про верхній шар реголіту товщиною приблизно 100 мкм. Завдяки відсутності води у місячному ґрунті в рідкому або газоподібному стані глибина проникнення радіохвиль може становити кілька десятків довжин хвиль, як і для оптичного діапазону. Проведені радарні дослідження в сантиметровомудекаметровому діапазоні довжин хвиль показали, що вони дозволяють оцінити склад та структуру поверхневого шару до глибини декількох кілометрів [72, 112]. Є приклади використання радарів, які працюють з використанням дециметрових хвиль в режимі синтезованої діаграми спрямованості [18, 109]. При дослідженнях космічних апаратів за допомогою апертурного синтезу [86] можна забезпечити просторову роздільну здатність приблизно 100 м з орбітальної відстані 100 км від поверхні Місяця, використовуючи реалістичні технічні параметри радарів.

Більшість місячних радарних досліджень проводилися на відносно низьких частотах для забезпечення дистанційного зондування досить товстих шарів місячної поверхні. Місяць ніколи не вивчався у міліметровому діапазоні спектру. Навіть спостереження з Землі обмежувалися довжиною хвилі 8.6 мм [28, 66], оскільки коротші міліметрові хвилі сильно поглинаються атмосферою Землі. Для заповнення проміжку між радіо- та оптичними вимірюваннями необхідні космічні радіолокаційні дослідження на міліметрових довжинах хвиль. Застосування супутникового бортового радара цього діапазону дало б змогу зробити наступне: 1) оцінити параметри та структуру верхнього шару місячного реголіту на глибину до декількох сантиметрів і 2) побудувати тривимірні топографічні моделі місячної поверхні, використовуючи методи радіолокації синтезованої діаграми бокового огляду, описані в роботах [16, 18, 113, 121]. Тут ми розглянемо можливі задачі, які можна вирішити за допомогою 3-мм радара, та оцінимо необхідні характеристики радара.

Схоже, доцільно використовувати 3-мм радар у трьох робочих режимах: а) активне моностатичне зондування місячної поверхні, б) радіолокаційне спостереження синтезованою діаграмою бокового огляду, в) пасивний (радіометричний) режим. Це дозволить: а) оцінити електрофізичні та структурні параметри верхнього шару товщиною до декількох сантиметрів з відносно грубим просторовим розділенням (~1 км); б) визначити відбивальні властивості місячної поверхні та реконструювати її тривимірну топографію з високою роздільною здатністю (кілька десятків метрів); в) вивчити просторовий розподіл та аномалії полів теплового випромінювання з метою виявлення глобальних та локальних неоднорідностей у місячній корі та мантії. В останньому режимі радіолокаційний передавач вимикається, а приймач реєструє випромінювання місячної поверхні. Як і у випадку активної моностатичної локації, просторова роздільна здатність визначається конструкцією радарної антени.

Відбитий радарний сигнал суттєво залежить від топографії Місяця при масштабах більше 1 см, мікротопографії умовно на масштабах менше 1 см і ефективних значень діелектричних констант поверхневого матеріалу. Відгук діелектричних матеріалів, прикладом яких є місячний поверхневий реголіт, на падаючу електромагнітну хвилю визначається зрушеннями зв'язаних зарядів. Це можуть бути електрони в атомах, іони в кристалах і диполі у молекулах. У міліметровому діапазоні для природних діелектриків немає характерних смуг поглинання. Він розташовується між довгохвильовими крилами електронних і іонних смуг та короткохвильовим крилом смуг, пов'язаних з стрибковим механізмом поляризації діелектриків. Діелектричні константи місячного реголіту — це ефективні значення; тобто вони визначаються не тільки властивостями матеріалу, але також щільністю місячного реголіту у масштабі, значно меншому за 1 мм. Слід нагадати, що середній розмір частинок місячної поверхні близький до 60 мкм [68]. Поверхневі неоднорідності порядку масштабу 1 мм створюють дифузну складову діаграми радарного розсіювання. Дзеркальні та дифузні компоненти можна описати, використовуючи теоретичну модель або евристичну, яка апроксимується відповідною функцією. Для ілюстративних цілей ми використовуємо тут однопараметричну фазову функцію Хеньї — Грінстейна  $\chi(\alpha) = (1 - g^2)(1 + g^2)$  $+g^{2}+2gcos\alpha)^{-3/2}$  [42], де  $\alpha$  — кут розсіяння, g параметр для характеристики переважного напрямку розсіювання.

На рис. 9 представлено результати нашого комп'ютерного моделювання розсіювання на шорстких поверхнях з параметром шорсткості, який характеризується середньоквадратичним розкидом нахилів поверхні. Ми застосовуємо спрощену 2-масштабну модель [10], яка розраховує дифузну складову радарного розсіювання за допомогою функції Хеньї — Грінстейна [42] зі значеннями параметра g = 0, 0.5 і 0.95. Перше значення відповідає ізотропному розсіюванню, останнє — квазідзеркальному. Для масштабів, набагато більших, ніж 1 мм, може бути корисним підхід, що ґрунтується на наближенні геометричної оптики [10]. Відстеження променів



**Рис. 9.** Нормалізований радарний сигнал як функція параметра  $\langle tg\theta \rangle$ , що характеризує шорсткість різних типів поверхонь (моделі 1 і 2), та для різних значень параметра *g* у функції Хеньї — Грінстейна

виконується за методикою, розробленою Д. Г. Станкевичем, Ю. Г. Шкуратовим та ін. [94, 96]. Ми розглядаємо два типи моделі шорстких випадкових поверхонь. Перша з них описується гауссовою статистикою висот і схилів. Друга модель дуже схожа, однак передбачає заміну ділянок з негативними висотами плоскими поверхнями з нульовими висотами (див. вставку на рис. 9). Залежність нормалізованого сигналу від характерного нахилу поверхні (tgθ), яка була розрахована для цих двох моделей, представлена на рис. 9. Наші оцінки показують, що основним фактором, що впливає на радарний відгук, є шорсткість поверхні, тобто варіації локальних поверхневих нахилів.

Таким чином, 3-мм радіолокаційне картографування може виявити ділянки з високою шорсткістю на масштабах кілька сантиметрів та більше, що може відповідати полям каменів і скель. Такі карти важливі для вибору безпечних місць для посадок на Місяць.

**Інфрачервоний спектрометр.** У видимому, близькому УФ- та близькому ІЧ-діапазонах (0.3...2.3 мкм) місячні спектри відбиття бідні на деталі. В УФ- та видимому діапазоні альбедо зменшується зі зменшенням довжини хвилі. Ця особливість пов'язана з ефектом поглинання в силікатах в УФ-частині спектру, де смуги поглинання пов'язані із перенесенням заряду типу кисень — метал та метал — метал [17], а також завдяки субмікроскопічному металевому залізу в реголітних частинках [40]. У мінералах серій плагіоклазу, піроксену та олівіну біля 1 і 2 мкм є слабкі кристалічні смуги d-d-типу, пов'язані з іонами Fe<sup>2+</sup> [17].

Виявлення смуги місячної води біля 3 мкм було несподіваним відкриттям величезної ваги [21, 23, 76, 102]. На жаль, це відкриття зроблено не без значних недоліків. М3-спектрометр, що використовувався у роботі [76], працював у діапазоні 0.4...3.0 мкм, і вимірювання при  $\lambda > 2.7$  мкм не були надійними. Спектральні дані, отримані в роботах [21, 102], мають дуже низьке просторове розділення. Крім того, всі ці вимірювання водяного льоду потребують ретельного видалення емісійної складової, внесок якої в загальний потік дуже різко збільшується з довжиною хвилі, починаючи від 2.5 мкм. Це видалення є складною проблемою, оскільки величина емісії залежить від температури поверхні, яка в свою чергу залежить від топографії поверхні, тобто локальної геометрії освітлення/спостереження [91].

Хоча спектральна деталь на 3 мкм приписується водяному льоду, фактично її походження не є повністю зрозумілим. Зокрема, ця смуга може виникати через моду О-Н-розтягування сполук ОН/Н<sub>2</sub>О, а не обов'язково чистого водяного льоду. Є три джерела сполук OH/H<sub>2</sub>O: ендогенна вода, вода, що походить від ядер комет і примітивних вуглецевих хондритних метеоритів, а також водень (протони) від сонячного вітру [9]. Насипні місячні силікати значно менш нестійкі, ніж за попередніми оцінками [41]; тим не менш схоже, що первинним джерелом не може бути Н<sub>2</sub>О, оскільки на зрілий місячний реголіт багато разів мали термічний вплив метеоритні удари різних масштабів. Найбільш вірогідним джерелом сполук ОН/Н2О можуть бути протони сонячного вітру, імплантовані на силікатну матрицю [24, 25, 67, 97].

Коливальна мода О-Н-сполук ОН/H<sub>2</sub>O спостерігається для водяного льоду та кристалічної води і гідроксилу в силікатах на різних довжинах хвилі, що можна побачити на рис. 10, запозиченого з роботи [21]. Отже, нове картування повного профілю 3-мкм смуги з роздільною здатністю порядку 100 м необхідне, зокрема, щоб розрізняти випадки, показані на рис. 10. Для цього необхідно буде охопити спектральний діапазон приблизно від 2.2 до 5.0 мкм з досить високою спектральною роздільною здатністю. Більш складна методика розрізнення відбитої та випроміненої (теплової) складових має вирішальне значення для подальшого аналізу [91].

3-мкм спектральне картування тісно пов'язане з можливим накопиченням пилових частинок поблизу місячних полюсів через їхню левітацію. Цей пил повинен бути насиченим протонами сонячного вітру, і отже, з'єднаннями ОН/H<sub>2</sub>O. Час такого насичення дуже короткий — близько 100 років. Більше того, характерна глибина проникнення протонів сонячного вітру близька до середнього розміру частинок пилу, які беруть участь у електростатичній левітації (0.2 мкм) [97]. Таким чином, пил, накопичений біля полюса, насправді є силікатним зі значною кількістю (до 10 %) сполук ОН/H<sub>2</sub>O.

Ще однією метою картування профілю 3-мкм смуги є вивчення часових варіацій глибини смуги, виявлених у попередніх спостереженнях [76, 102]. Ці варіації, ймовірно, пов'язані з сонячним теплом, яке може забезпечити випаровування водню як із внутрішньої поверхні великих пор, так і з внутрішньої поверхні закритих пухирців і порожнин, які виникають внаслідок утворення пухирів при протоновому опроміненні реголітних частинок. Випаровування зменшує кількість О-Н-зв'язків, призводячи до ослаблення смуги 3 мкм. При охолодженні сполуки внутрішній водень знову конденсується на внутрішній поверхні реголітових частинок, що призводить до посилення смуги 3 мкм.

Водень може накопичуватися всередині реголітових частинок від сонячного вітру та/або завдяки дифузії летких речовин, що спочатку містилися у місячній речовині. Дифузія різко збільшується при локальному нагріванні, спричиненому впливом мікрометеороїдного удару. Ці процеси можуть продукувати помітний тиск у атмосфері пухирців/пор. Маса такої внутрішньої водневої атмосфери може бути величезною, оскільки внутрішня поверхня



*Рис.* 10. Коливальні смуги О-Н від H<sub>2</sub>O та OH: 1 — для водяного льоду, 2 — для гідроксилу в силікаті (дані [27])

частинок реголіту набагато більша, ніж поверхня сфери Місяця.

Камера HiRes з двома спектральними смугами. € велика кількість зображень LROC NAC з високим просторовим розділенням порядку 0.5...1.0 м, які були отримані за допомогою вузькокутової камери LRO NAC [82]. Ці зображення охоплюють всю місячну поверхню, причому для багатьох місць картування зроблено кілька разів. Проте ці зображення були отримані в інтегральному світлі. Ми розглядаємо таке HiRes-картування вибраних місячних ділянок як мінімум у двох спектральних діапазонах як високо пріоритетну задачу. Спектральні смуги камери HiRes можуть бути центровані поблизу  $\lambda = 0.75$  і 0.95 мкм. Це відповідає короткохвильовому краю та мінімуму асиметричної спектральної депресії, утвореної смугами піроксенів та олівінів біля 1 мкм, що перекриваються [17]. Ці дані можуть бути використані для картування величини FeO та параметра ступеня зрілості, що характеризує експозиційний вік поверхні [14, 65, 77].

На рис. 11 наведено приклад застосування такої методики до ділянки, що включає частину великого кратера Альфонс. Для цієї ілюстрації ми використовуємо дані камери «Клементіна UVVIS». Як можна побачити, розподіли вмісту FeO та ступеня зрілості дуже різні, що свідчить про незалежність спектральних смуг, центрованих у довжинах хвиль  $\lambda = 0.75$  і 0.95 мкм. Ступінь



Рис. 11. Розподіли вмісту FeO та ступеня зрілості ОМАТ у кратері Альфонс

зрілості пов'язана з параметром оптичної зрілості ОМАТ [14, 65]. Рис. 11, *а* показує, що у кратері є дуже яскраві плями, які відповідають високому вмісту FeO; ці плями — це класичні приклади місячних темних мантій, які розглядаються як пізні вулканічні утворення. У той же час цих утворень не видно на карті параметра ОМАТ (рис. 11,  $\delta$ ), що свідчить про не надто малий вік утворення.

Важливу додаткову інформацію про місячну поверхню можна отримати з просторовим розділенням близько 1 м, використовуючи так звану методику фазових відношень, запропоновану Ю. Г. Шкуратовим та ін. [6]. Суть цієї методики була докладно описана Кайдашем та ін. [51]: світло, що розсіюється, можна описати функцією  $A(\alpha) = A_0 f(\alpha)$ , де  $A_0$  — альбедо, виміряне при нульовому фазовому куті  $\alpha = 0, f(\alpha)$  нормована фазова функція [39, 91]. Фазова функція визначається складністю структури поверхні. Для різних точок місячної поверхні фазові функції трохи різні. Зображення параметра нахилу функції містить інформацію про шорсткість поверхні у масштабах менше розміру піксела, яка впливає на фазову функцію. Найпростішим підходом до вивчення варіацій нахилу є картування фазового відношення  $A(\alpha_1)/A(\alpha_2)$ , тобто побудова відношення суміщених зображень, отриманих при різних фазових кутах  $\alpha$ . Зображення фазового відношення пригнічує вплив варіацій альбедо по поверхні на вихідному зображенні. Значення кутів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  визначають масштаби шорсткості, що впливають на відношення  $A(\alpha_1)/A(\alpha_2)$ . Наприклад, при малих  $\alpha$  важливим параметром є щільність упаковки частинок на поверхні, але коли  $\alpha$  достатньо велике, це може бути характерний нахил поверхні.

Картування фазового відношення є перспективним інструментом дистанційного зондування Місяця. Використовуючи цей метод з даними, отриманими LRO NAC, ми знайшли аномалії фазового відношення навколо місць посадки всіх модулів КА «Аполлон» [50]. Ці аномалії охоплюють ділянки в розмірі декількох сотень метрів, маючи меншу шорсткість поверхні, що пов'язано з видуванням ґрунтів з дуже дрібними частинками газовими струменями з двигунів. Також були отримані зображення фазових відношень місць посадки радянських «Луна-16», «Луна-20», «Луна-23» і «Луна-24». Як і у випадку КА «Аполлон», вони показують дифузні особливості, пов'язані з місцями посадки. На відміну від усіх інших космічних апаратів з м'якою посадкою, місце посадки «Луна-24» несподівано не проявляється на зображеннях фазового відношення. Це свідчить про те, що посадковий майданчик «Луна-24», можливо, було невірно ідентифіковано, та насправді він був місцем аварійної посадки «Луна-23» — відстань між посадковими майданчиками становить лише 1 км [52, 92].

Таким чином, схоже, що техніка фазових відношеньдопомогла розв'язати стару загадку, пов'язану з радянськими зондами, які доставили місячні зразки на Землю.

Також були отримані нові результати щодо схилової рухомості реголіту на внутрішніх сторонах кратера Джордано Бруно [93]. Зображення фазового відношення для регіонів показують багато нових деталей, деякі з яких практично не видимі на відповідних зображеннях альбедо. Ці дослідження дозволяють зробити висновки про вік кратера, який оцінюється приблизно в 10 мільйонів років, тобто, кратер Джордано Бруно дуже молодий. Це додатковий приклад ефективності методу фазових відношень та його придатності до місячної місії, що презентується у цій роботі.

Рис. 12 ілюструє ефективність методу фазових відношень. На ньому показано молодий яскравий кратер Чаплигін Б, розміщений на краю кратера Чаплигін. Кратер діаметром 1.5 км з широтою центра –4.1° та довготою центра 151.7°. Його видно поблизу центра контекстного зображення мозаїки LRO WAC на рис. 12, *а*. Використовуючи дані LRO NAC, ми наводимо яскравісне зображення частини кратера при  $\alpha = 8°$  (рис. 12, *б*) та зображення фазового відношення A(52°)/A(8°) (рис. 12, *в*) з поверхневим розділен-



**Рис. 12.** Околиці кратера Чаплигін Б в центрі кадру (*a*), яскраве зображення частини кратера при  $\alpha = 8^{\circ}$  (*b*) та зображення фазового відношення  $A(52^{\circ})/A(8^{\circ})$  (*b*). Для обчислення фазового відношення використано дані LRO NAC

ням 1 м. Кратер має променеву систему, яка включає яскраві та темні промені. Якщо доступне лише одне зображення, отримане при великому α, неможливо відрізнити причини невідповідності яскравості — вона може бути викликана або відмінностями хімічного складу матеріалу, або відмінностями структури поверхні [53]. Фазове відношення  $A(52^{\circ})/A(8^{\circ})$ , показане на рис. 12, в, не відображає різницю між двома типами променів. Цей приклад недвозначно вказує на те, що у випадку кратера Чаплигін Б ми маємо справу з різним хімічним складом викинутих матеріалів. Камера HiRes з поверхневою роздільною здатністю 1 м у спектральних каналах  $\lambda = 0.75$  і 0.95 мкм забезпечить адекватну характеристику молодих формувань місячної поверхні, що важливо для місячної геології. Для цього будуть побудовані зображення різних фазових відношень надзвичайно молодих кратерів та районів з великими схиловими зсувами.

## висновки

1. У даній роботі ми описуємо подвійну за призначенням місячну місію, яка включає розміщення радіоастрономічного посадкового модуля на зворотному боці Місяця в околицях кратера Брауде поблизу південного полюса та навколомісячного супутника-ретранслятора з науковим навантаженням на витягнутій орбіті з перицентром над північним полюсом (100 км над поверхнею) та апоцентром над південним полюсом (висота близько 3000 км). Посадковий модуль буде бачити ретрансляційний супутник на частині його орбіти, що прилягає до апоцентра. Цей модуль містить п'ять дипольних антен, призначених для радіоастрономічних досліджень. Орбітальний модуль буде обладнано засобами дистанційного зондування, які раніше не використовувалися в космічних дослідженнях Місяця, і прототипи яких вже використовуються науковими організаціями України.

2. Незважаючи на низьку ефективну площу радіоастрономічної антени, можна буде проводити важливі дослідження астрофізичних об'єктів на наддовгих хвилях. Наприклад, в режимі радіоспектрометра (від сотень кГц до 40 МГц) можуть бути вивчені сонячні спалахи різних типів, викиди корональної маси, радіовипромінювання Юпітера (сплески L i S) і Сатурна (кілометрові радіовимірювання). Дослідження мерехтінь на просторових неоднорідностях електронів у міжпланетній та міжзоряній плазмі, а також на навколомісячній плазмі можуть бути метою місячного радіотелескопа. Перекриття частот в діапазоні 10...40 МГц дозволить працювати разом з наземними радіотелескопами (УТР-2, ГУРТ) Радіоастрономічного інституту НАН України, діяльність яких нижче частоти 10 МГц обмежена земною іоносферою. Спільні спостереження астрофізичних об'єктів за допомогою місячних і земних антен, які координуються через супутник-ретранслятор, можливі на дуже довгій базі (відстань Земля — Місяць). Відсутність земного шуму дозволить вирішувати задачі пошуку космологічних ефектів, пов'язаних з лінією нейтрального водню при z = 50...100.

3. Посадковий апарат також може бути обладнаний панорамною камерою з колірними та поляризаційними фільтрами для вивчення сяйва горизонту поблизу полюсу, спричиненого пилом, що левітує. Пилові частинки злітають над районами місячного термінатора за рахунок електростатичних сил, що створюються плазмою сонячного вітру і ефектом електронної фотоемісії, викликаної випромінюванням сонячного УФ- і рентгенівського випромінювання.

4. Орбітальний модуль включає в себе інфрачервоний спектрометр, який дозволяє відрізняти коливальні моди О-Н від H<sub>2</sub>O та OH у місячному ґрунті (див. рис. 10). Додатковою важливою метою вимірювань є часові варіації смуги 3 мкм. Ці зміни можуть бути викликані процесом випаровування/конденсації всередині реголітових частинок при нагріванні/охолодженні, пов'язаним з внутрішнім воднем, який накопичується у порах і пухирцях частинок реголіту. ІЧ-спектрометр повинен охоплювати спектральний діапазон приблизно від 1 до 5 мкм. Картування великої площі поблизу північного полюса Місяця буде забезпечуватися з просторовим розділенням 100 м.

5. Корисне навантаження цього модуля також включає в себе камеру HiRes для отримання зображень фазового відношення обраних областей для того, щоб охарактеризувати структурні і мінералогічні параметри молодих місячних поверхневих утворень з розділенням 1 м.

6. Використання 3-мм радара з режимом бокового огляду (Радіоастрономічний інститут НАН України), що працює у двох поляризаціях, дозволить отримувати не тільки карти радіояскравості поверхні, яка тісно пов'язана з його шорсткістю, але й поліпшити топографічну модель Місяця з просторовим розділенням порядку 100 м. Такі вимірювання забезпечують оцінку електрофізичних та структурних параметрів верхнього шару реголіту до декількох сантиметрів, і роблять доступним просторовий розподіл поля теплового випромінювання з метою пошуку глобальних та локальних неоднорідностей у структурі місячної кори та мантії.

На думку авторів, запропонована місія для проведення досліджень на зворотній стороні супутника Землі Місяця з використанням посадкового модуля та спеціального місячного орбітального модуля дозволить досягти значних успіхів у вивченні Місяця та інших об'єктів Всесвіту.

Автори вдячні командам космічних місій «Кассіні», STEREO, GOES, SOHO, SDO за можливість роботи з даними вимірювань цих КА. Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (Державний реєстраційний номер 0117U002396).

- 1. Абранін Е. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2 // Радиофизика и радиоастрономия. — 1997. — 2, № 1. — С. 95—102.
- Доровський В. В., Мельник В. М., Коноваленко О. О., Бубнов І. М., Грідін А. О., Шевчук М. В., Фалькович І. С., Коваль А. О., Руткевич Б. П., Резник О. П., Рукер Г. О., Панченко М., Белов О. С., Христенко О. Д., Квасов Г. В., Єрін С. М. Наблюдения Солнечного U-всплеска в полосе частот 10—70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, № 2. — С. 101—106.
- Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г.В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М.,

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения // Радиофизика и радиоастрономия. — 2016. — **21**, № 2. — С. 83—131.

- Милостна К. Ю., Захаренко В. В. Поиск и исследование грозовой активности на Сатурне и других планетах Солнечной системы // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. 18, N 1. С. 12—25.
- Милостна К. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Фишер Г., Зарка Ф., Сидорчук М. А. Тонкая временная структура молний на Сатурне // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — 19, N 1. — С. 10—19.
- Шкуратов Ю. Г., Кислюк В. С., Литвиненко Л. Н., Яцкив Я. С. Модель Луны для проекта «Укрселена» // Космічна наука і технологія. Додаток. — 2004. — 10, № 2. — С. 3—51.
- Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. The new preamplification system for the UTR-2 radio telescope // Exp. Astron. - 2001. - 11, N 2. -P. 85-112.
- Alexander J. K., Kaiser M. L., Novaco J. C., Grena F. R., Weber R. R. Scientific instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 satellite // Astron. and Astrophys. – 1975. – 40. – P. 365–371.
- Arnold J. R. Ice in the lunar polar regions // J. Geophys. Res. - 1979. - 84. - P. 5659-5668.
- Bass F. G., Fuks I. M. Wave scattering from statistically rough surfaces. — Oxford, New York: Pergamon Press, 1979.
- Bell M. E., Murphy Tara, Johnston S., Kaplan D. L., Croft S., Hancock P., Callingham J. R., Zic A., Dobie D., Swiggum J. K., Rowlinson A., Hurley-Walker N., Offringa A. R., Bernardi G., Bowman J. D., Briggs F., Cappallo R. J., Deshpande A. A., Gaensler B. M., Greenhill L. J., Hazelton B. J., Johnston-Hollitt M., Lonsdale C. J., McWhirter S. R., Mitchell D. A., Morale M. F.s, Morgan E., Oberoi D., Ord S. M., Prabu T., Shankar N. Udaya, Srivani K. S., Subrahmanyan R., Tingay S. J., Wayth R. B., Webster R. L., Williams A., Williams C. L. Time-domain and spectral properties of pulsars at 154 MHz // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2016. – 461, N 1. – P. 908–921.
- Bezvesilniy O. O., Dukhopelnykova I. V., Vinogradov V. V., Vavriv D. M. Retrieving 3-D topography by using a singleantenna squint-mode airborne SAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2007. – 45, N 11. – P. 3574–3582.
- Bezvesilniy O. O., Vynogradov V. V., Vavriv D. M. Highaccuracy doppler measurements for airborne SAR applications // Proc. 5th European Radar Conf. October 2008. – Amsterdam, The Netherlands, 2008. – P. 29–32.
- Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., Jolliff B. L. Clementine images of the lunar sample-return stations: refinement of FeO and TiO<sub>2</sub> mapping techniques // J. Geophys. Res. – 1997. – 102, N 16. – P. 319–325.

- Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Zhouck I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 Radio Telescope. Experimental techniques and data processing // Astrophys. and Space Sci. – 1978. – 54, N 1. – P. 3–36.
- Burns J. O., Duric N., Taylor G. J., Johnson S. W. Observatories on the Moon // Sci. Amer. – 1990. – 262. – P. 18–25.
- 17. *Burns R*. Mineralogical applications of crystal field theory. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993. — 459 p.
- Bussey D. B., Spudis P. D., Nozette S., Lichtenberg C. L., Raney R. K., Marinelli W., Winters H.L. Mini-RF: Imaging radars for exploring the lunar poles // Lunar Planet. Sci. Conf. 39th. – LPI Houston, 2008.
- Cecconi B. Goniopolarimetric techniques for low-frequency radio astronomy in space // Observing Photons in Space / Eds M. C. E. Huber, A. Pauluhn, J. L. Culhane, J. G. Timothy, K. Wilhelm, A. Zehnder. – ISSI Scientific Reports Ser, Springer, 2010. – P. 263–277.
- Chertok B. Rockets and people. The Moon Race. Washington, DC., 2011. IV. NASA SP-2011-4110.
- Clark R. N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon // Science. – 2009. – 326. – P. 562–564.
- Condoleo E., Cinelli M., Ortore E., Circi C. Stable orbits for lunar landing assistance // Adv. Space Res. – 2017. – 60, N 7. – P. 1404–1412.
- Crawford I., Joy K. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. – 2014. – 372. – id. 20130315.
- 24. Crawford I. A., Zarnecki J. Astronomy from the Moon // Astron. Geophys. – 2008. – 49. – P. 2.17–2.19.
- Crider D. H., Vondrak R. R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits // J. Geophys. Res. - 2000. - 105. - P. 26773-26782.
- Dessler A. J. Jupiter's magnetic field and magnetosphere // Physics of the Jovian magnetosphere / Ed. A. J. Dessler. – Cambridge: Cambridge University Press, 1983. – P. 1–50.
- Dyar M. D., Hibbitts C. A., Orlando T. M. Mechanisms for incorporation of hydrogen in and on terrestrial planetary surfaces // Icarus. – 2010. – 208. – P. 425–437.
- Evans J. V., Pettengill G. H. The radar cross-section of the Moon // J. Geophys. Res. - 1963. - 68, N 17. - P. 5098-5099.
- Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // Exp. Astron. 2011. 32, N 2. P. 127–145.
- Fischman M. A. Sensitivity of a 1.4 GHz Direct-Sampling Digital Radiometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1999. – 37, N 5. – P. 2172–2180.
- Fisher G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C.,

*Delcroix M*. A giant thunderstorm on Saturn // Nature. — 2011. — **475**, N 7354. — P. 75—77.

- Freeman J. W., Ibrahim B. Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheets // The Moon. – 1975. – 14. – P. 103–114.
- Furlanetto S. R., Peng O. S., Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe // Phys. Repts. - 2006. - 433, N 4-6. -P. 181-301.
- 34. Garrick-Bethell I., Head J. W., Pieters C. M. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls // Icarus. – 2011. – 212. – P. 480–492.
- 35. Gault D. E., Adams J. B. Collins R. J., Kuiper G. P., O'Keefe J. A., Phinney R. A., Shoemaker E. M. Lunar theory and processes: Post-sunset horizon "Afterglow" // Icarus. — 1970. — 12. — P. 230—232.
- Gordon M. A., Sorochenko R. L. Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Application. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002.
- Goswami J. N., Annadurai M. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon // Curr. Sci. – 2009. – 96, N 4. – P. 486–491.
- Guang-You Fang, Bin Zhou, Yi-Cai Ji, Qun-Ying Zhang, Shao-Xiang Shen, Yu-Xi Li, Hong-Fei Guan, Chuan-Jun Tang, Yun-Ze Gao, Wei Lu, Sheng-Bo Ye, Hai-Dong Han, Jin Zheng, Shu-Zhi, Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission // Res. Astron. Astrophys. — 2014. — 14, N 12. — P. 1607—1622.
- Hapke B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993. — 450 pp.
- 40. *Hapke B*. Space weathering from Mercury to the asteroid belt // J. Geophys. Res. 2001. **106**. P. 10,039–10,073.
- 41. Hauria E. Y., Saal A. T., Rutherford M. J., Van Orman J. A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences // Earth and Planet. Sci. Lett. 2015. 409. P. 252-264.
- Henyey L. C. Greenstein J. L. Diffuse radiation in the galaxy // Astrophys. J. 1941. 93. P. 70–83.
- Horanyi M., Walch B., Robertson S., Alexander D. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust // J. Geophys. Res. – 1998. – 103E, N 4. – P. 8575–8580.
- 44. *Howell K. C.* Three-dimensional periodic halo orbits // Celest. Mech. 1984. **32**, N 1. P. 53–71.
- Irvine W. M. Multiple scattering by large particles // Astrophys. J. 1965. 4. P. 1563–1575.
- 46. Jeong M., Choi Y.-J., Kim S. S., Kang K.-I., Shkuratov Y. G., Kaydash V. G., Videen G., Sim C. K., Kim I.-H., Preliminary Design of Wide-Angle Polarimetric Camera for the First Korean Lunar Mission // 3rd Planetary Data Workshop. – 2017. – LPI Contrib. N 1986. – 7035.pdf.
- 47. *Jester S., Falcke H.* Science with a lunar low-frequency array: from the dark ages of the Universe to nearby exoplanets // New Astron. Rev. 2009. 53. P. 1–26.

- 48. Jin Weidong, Zhang Hao, Yuan Ye, Yang Yazhou, Lucey Paul, Shkuratov Yuriy, Kaydash Vadim, Zhu Meng-Hua, Xue Bin, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith // Geophys. Res. Lett. –2015. – 42, N 20. – P. 8312–8319.
- Kaiser M. L. A low-frequency radio survey of the planets with RAE-2 // J. Geophys. Res. – 1977. – 82. – P. 1256– 1260.
- Kaydash V., Shkuratov Y., Korokhin V., Videen G. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter // Icarus. 2011. 211. P. 89–96.
- Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G., Phase-ratio imagery as a tool of lunar remote sensing // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2012. —113, N 18. — P. 2601— 2607.
- Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Landing of the probes Luna 23 and Luna 24 remains an enigma // Planet. and Space Sci. – 2013. – 89. – P. 172–182.
- Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Dark halos and rays of young lunar craters: A new insight into interpretation // Icarus. – 2014. – 231. – P. 22–33.
- 54. Keller J. W., Petro N. E., Vondrak R. R., and the LRO team. The Lunar Reconnaissance Orbiter Mission – Six years of science and exploration at the Moon // Icarus. – 2016. – 273. – P. 2–24.
- 55. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. V., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O. Thirty-elements active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope // Exp. Astron. – 2003. – 16, N 3. – P. 149–164.
- Konovalenko A. A., Sodin L. G. Neutral 14N in the interstellar medium // Nature. – 1980. – 283. – P. 360–361.
- Konovalenko A. A., Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A // Nature. — 1981. — 294. — P. 135—136.
- 58. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pvlaev O., Koshovvv V., Lozinskv A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Grieß-Meier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The

modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT // Exp. Astron. — 2016. — **42**, N 1. — P. 11—48.

- Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Mann G., Bougeret J.-L., Kaiser M. L., Briand C., Zarka P., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Koval A. A., Mel'nik V. N., Mukha D. V., Panchenko M. Synchronized observations by using the STEREO and the largest groundbased decametre radio telescope // Exp. Astron. Astrophys. Instrument. Methods. — 2013. — 36, N 1–2. — P. 137—154.
- Konovalenko A.A., Stepkin S.V. Radio recombination lines // In: Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky / Eds L. Gurvits, S. Frey, S. Rawlings. – Budapest: EAS Publ. Ser., 2005. –15. – P. 271–295.
- Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., Yerin S. N. Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope // Proc. of the VII-th Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14). – Kharkiv, Ukraine, 2014. – P. 25–29.
- 62. Litvinenko G. V., Shaposhnikov V. E., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Panchenko M., Dorovsky V. V., Brazhenko A. I., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Melnik V. N. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra // Icarus. – 2016. – 272. – P. 80–87.
- Liu Y., Park J. S., Schnare D., Hill E., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: Texture and shape characteristics // J. Aerospace Eng. – 2008. – 21, N 4. – P. 272–279.
- Louis C., Lamy L., Zarka P., Cecconi B., Hess S. L. Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/RPWS // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. 122, N 9. P. 9228–9247.
- Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon // Science. 1995. 268. P. 1150—1153.
- 66. Lynn V. L., Sohigian M. D., Crocker E. A. Radar observations of the Moon at a wavelength of 8.6 millimeters // J. Gephys. Res. – 1964. – 69, N 4. – P. 781–783.
- Managadze G. G., Cherepin V. T., Shkuratov Y. G., Kolesnik V. N., Chumikov A. E. Simulating of OH/H<sub>2</sub>O formation by solar wind at the lunar surface // Icarus. – 2011. – 215, N 1. – P. 449–451.
- McCoy J. E., Criswell D. R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust // Proc. Lunar Sci. Conf. 5th. – LPI Houston, 1974. – P. 2991–3005.
- Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A. Solar sporadic radio emission in the decametre waveband // Astron. and Astrophys. Trans. — 2005. — 24, N 5. — P. 391—401.
- Mimoun D., Wieczorek M. A., Alkalai L., Banerdt W. B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H.,

Flohrer J., Garcia R. F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C. L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konovalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., LognonnéPh., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan Gr., Zarka Ph. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon // Exp. Astron. – 2012. – 33, N 2–3. – P. 529–585.

- Mitrofanov I. G., Zelenyi L. M., Tret'yakov V. I. Upgraded program of Russian lunar landers: studying of lunar poles // Proc. Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. — LPI Contrib., 2012. — N 1685. — 3025.
- Ono T., Oya H. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft // Earth, Planets and Space. – 2000. – 52. – P. 629–637.
- Park J. S., Liu Y., Kihm K. D., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution // J. Aerospace Eng. 2008. 21, N 4. P. 266–271.
- 74. Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Analytical light-scattering solution for Chebyshev particles // J. Opt. Soc. Amer. – 2007. – A24, N 4. – P. 1103–1119.
- Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Electromagnetic wave scattering from particles of arbitrary shapes // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2011. – 112, N 11. – P. 1636–1645.
- 76. Pieters C. M., Goswami J. N., Clark R. N., and the M3 Science Team. Character and spatial distribution of OH/H<sub>2</sub>O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1// Science. 2009. **326**. P. 568 572.
- Pieters C., Shkuratov Y., Kaydash V., Stankevich D., Taylor L. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine image data // Icarus. – 2006. – 184. – P. 83–101.
- Pinet P. C., Shevchenko V. V., Chevrel S. D., Daydou Y., Rosemberg C. Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma Formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data // J. Geophys. Res. Planets. — 2000. — 105E, N 4. — P. 9457—9475.
- Pritchard J. R., Loeb A. Constraining the unexplored period between the dark ages and reionization with observations of the global 21 cm signal // Phys. Rev. D-Part. and Fields. 2010. 82. 023006.
- *Popel S. I., Zelenyi L. M.* Dusty plasmas over the Moon // J. Plasma Phys. – 2014. – 80, N 6. – P. 885–893.
- Rennilson J. J., Criswell D. R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // The Moon. - 1974. - 10. -P. 121-142.
- Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S. J., Thomas P. C., Denevi B. W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M. A., Caplinger M. A., Ghaemi F. T., Schaffner J. A., Malin M. C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T. N., Eliason E. M., McEwen A. S., Turtle E., Jolliff B. L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter

Camera (LROC) instrument overview // Space Sci. Rev. -2010. - 150. - P. 81-124.

- Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., Denis L. A low-noise, high-dynamicrange, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // Astron. and Astrophys. — 2010. — 510. id. A16.
- 84. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A, Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions // Astron. and Astrophys. – 2014. – 568. – id. A53.
- 85. *Schmitt H. H.* Return to the Moon: Exploration, Enterprise, and Energy in the Human Settlement of Space. — Copernicus books, NY: Springer-Verlag, 2006.
- 86. *Scolnik M. I.* Radar Handbook. New York: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- Severny A. B., Terez E. I., Zvereva A. M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2 // The Moon. 1975. 14. P. 123–128.
- Shkuratov Y., Starukhina L., Kreslavsky M., Opanasenko N., Stankevich D., Shevchenko V. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies // Icarus. – 1994. – 109. – P. 168–190.
- Shkuratov Y., Lytvynenko L., Shulga V., Yatskiv Y., Vidmachenko A., Kislyuk V., Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon // Adv. Space Res. – 2003. – 31, N 11. – P. 2341–2345.
- 90. Shin-ichi Sobue, Hayato Okumura, Susumu Sasaki, Manabu Kato, Hironori Maejima, Hiroyuki Minamino, Satoru Nakazawa, Hisashi Otake, Naoki Tateno, Hisashi Konishi, Katsuhide Yonekura, Hoshino Hirokazu, Jun Kimura. The project highlight of Japan's Lunar Explorer Kaguya (SE-LENE) // Lunar Planet. Sci. Conf. 40th. – LPI Houston, 2009. – 1224.pdf.
- 91. Shkuratov Y., Kaydash V., Korokhin V., Velokodsky Y., Opanasenko N., Videen G. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface // Planet. and Space Sci. -2011. - 59. - P. 1326-1371.
- 92. Shkuratov Y., Kaydash V., Sysolyatina X., Razim A., Videen G. Lunar surface traces of engine jets of Soviet sample return probes: the enigma of the Luna-23 and Luna-24 landing sites // Planet. and Space Sci. –2013. –75. – P. 28–36.
- 93. Shkuratov Y., Kaydash V., Videen G. The crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery // Icarus. – 2012. – 218, N 1. – P. 525–533.
- 94. Shkuratov Y. G., Stankevich D. G., Petrov D. V., Pinet P.C., Cord A. M., Daydou Y. H. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: shadowing and multiple scatter // Icarus. – 2005. – 173. – P. 3–15.
- 95. Stanislavsky A., Konovalenko A., Rucker H., Abranin E., Kaiser M., Dorovskyy V., Mel'nik V., Lecacheux A. Antenna

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

performance analysis for decameter solar radio observations // Astron. Nachr. – 2009. – **330**. – P. 691–697.

- Stankevich D., Shkuratov Y. Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2004. – 87, N 3–4. – P. 289–296.
- Starukhina L. V., Shkuratov Y. G., The lunar poles: water ice or chemically trapped hydrogen? // Icarus. – 2000.– 147. – P. 585–587.
- Starukhina L. V., Shkuratov Y. G. Swirls on the Moon and Mercury: meteoroid swarm encounters as a formation mechanism // Icarus. – 2004. – 167, N 1. – P. 136–147.
- Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – 374, N 3 – P. 852–856.
- 100. Stubbs T., Vondrak R., Farrell W. A Dynamic fountain model for lunar dust // Lunar Planet. Sci. – 2005. – 36. – (http:// www.lpi.usra. edu/meetings/lpsc2005/pdf/1899.pdf).
- 101. Sun Huixian, Wu Ji, Dai Shuwu, Zhao Baochang, Shu Rong, Chang Jin, Wang Huanyu, Zhang Xiaohui, Ren Qiongying, Chen Xiaomin, Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao. Introduction to the payloads and the initial observation results of Chang'E-1 // Chin. J. Space Sci. – 2008. – 28, N 5. – P. 374–384.
- 102. Sunshine J. M., Farnham T. L., Feaga L. M., Groussin O., Merlin F., Milliken R. E., A'Hearn M. F. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact Spacecraft // Science. – 2009. – 326. – P. 565–568.
- 103. *Taylor L*. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances // Eng. Constr. and Operations in Space IV, ASCE Publication, Proceedings of Space. — 1994. — 94. — P. 678—686.
- 104. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N. Sensitivity of an active antenna array element for the low-frequency radio telescope GURT // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 2017. – 65, N 9. – P. 4636–4644.
- 105. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Seredkina A. A. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere // Proc. of the International Astronomical Union. – 2012. – 8, N S291. – P. 530–532.
- 106. Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosole C., Rucker H. O. Detection of individual pulses from pulsars B0809+ 74; B0834+ 06; B0950+ 08; B0943+ 10; B1133+ 16 in the decameter waves range // Radio Phys. and Radio Astron. – 2006. – 11. – P. 113–133.
- 107. Vaniman D., French B., Heiken G. Afterword // Lunar Sourcebook / Eds G. H. Heiken, D. T. Vaniman, B. M. French. — NY: Cambridge University Press, 1991. — P. 633—641 (Chapter 11).
- 108. Vasilyev O. Y., Kuzin A. I., Kravtsov A. A., Bulakh E. V., Vynogradov V. V., Vavriv D.M. Multifunctional digital

receiver-spectrometer // Radio Phys. and Radio Astron. — 2014. — **19**, N 3. — P. 276—289.

- 109. *Vondrak R., Keller J., Russell C.* (Eds) Lunar Reconnaissance Orbiter Mission. NY: Springer, 2010. 302 p.
- 110. Walmsley C. M., Watson W. D. The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon // Astrophys. J. – 1982. – 260. – P. 317–325.
- 111. Wittenberg L., Santarius J., Kulchinski G. Lunar source of <sup>3</sup>He for fusion power // Fusion Technol. — 1986. — 10. — P. 167—178.
- 112. Yan Su, Guang-You Fang, Jian-Qing Feng, Shu-Guo Xing, Yi-Cai Ji, Bin Zhou, Yun-Ze Gao, Han Li, Shun Dai, Yuan Xiao and Chun-Lai Li Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar // Res. Astron. Astrophys. – 2014. – 14, N 12. – P. 1623–1632.
- 113. Yocky D. A., Wahl D. E., Jakowarz C. V. (Jr.) Terrain elevation mapping results from airborne spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 2004. – 42. – P. 301–308.
- 114. Zakharenko V. V. Sporadic radio emissions from celestial sources: studies at decameter wavelengths // Radio Phys. and Radio Astron. – 2011. – 2, N 4. – P. 287–298.
- 115. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V. Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT // J. Astron. Instrument. – 2016. – 5, N 04. – id.1641010.
- 116. Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Fischer G., Konovalenko A. A., Zarka P., Grieβmeier J.-M., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Ryabov V. B., Rucker, H., Ravier P., Sidorchuk M. A., Cecconi, B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Kozhyn R. V., Mukha D. V., Pallier L., Schneider J., Shevchenko V. A., Vinogradov V. V., Weber R., Nikolaenko V. S. Identification of Saturn lightings recorded by the UTR-2 radio telescope and Cassini spacecraft // Radio Phys. and Radio Astron. — 2011. — 2, N 2. — P. 93—98.
- 117. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Grieβmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., Nikolaenko V. Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2// Europ. Planet. Sci. Congress, 23–28 September 2012. Madrid, Spain. 2012. id. EP-SC2012-186. Available from: http://meetings.copernicus.org/epsc2012.
- 118. Zakharenko V. V., Nikolaenko V. S., Ulyanov O. M., Motiyenko R. A. A high time resolution receiver for radio emission investigation // Radio Phys. and Radio Astron. – 2007. – 12, N 3. – P. 233–242.
- 119. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Grieβmeier J. M., Cognard I., Nikolaenko V. S. Detection of decametre-
- ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2013. — **431**, N 4. — P. 3624—3641.

- 120. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Grieβmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Konovalenko A., Lamy L., Mimoun D., Aminaei A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon // Planet. Space Sci. – 2012. – 74. – P. 156– 166.
- 121. Zebker H. A., Goldstein R. M. Topographic mapping from interferometric SAR observations // J. Geophys. Res. – 1986. – 91B, N 5. – P. 4993–4999.
- 122. Zhang Hao, Yang Yazhou, Jin Weidong, Yuan Ye, Lucey Paul, Zhu Meng-Hua, Kaydash Vadim, Shkuratov Yuriy, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei, Xue Bin. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance // Geophys. Res. Lett. — 2015. — 42, N 17. — P. 6945—6950.
- 123. *Zook H., Potter A., Cooper B.* The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow // Lunar Planet. Sci. 1995. **26**. P. 1577–1578.
- 124. Zubko E., Shkuratov Yu., Kiselev N., Videen G. DDA simulations of light scattering by small irregular particles with various structure // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2006. 101. P. 416–434.
- 125. Zubko E., Shkuratov Yu., Mishchenko M., Videen G. Light scattering in a finite multi-particle system // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2008. – 109. – P. 2195–2206.
- 126. Zubko E., Weinberger A., Zubko N., Shkuratov Y., Videen G. Umov effect in single-scattering dust particles: Effect of irregular shape // Opt. Lett. – 2017. – 42, N 10. – P. 1962– 1965.

Стаття надійшла до редакції 21.12.17

## REFERENCES

- Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V.V., Konovalenko A.A. Structura s parametry novoi sistemy antennogo usilenia radioteleskopa UTR-2 [Structure and parameters of new system of antenna amplification of radio telescope UTR-2]. *Radiofizika i radioastronomia*, 2 (1), 95–102 (1997) [in Russian].
- Dorovskyy V. V., Melnyk V. M., Konovalenko A. A., Bubnov I. N., Gridin A. A., Shevchuk N. V., Falkovych I. S., Koval A. A., Rutkevych B. P., Reznik A. P., Rucker H. O., Panchenko M., Belov A. S., Khrystenko A. D., Kvasov G. V., Yerin S. N. Nabludenia solnechnogo U-vspleska v polose chastot 10–70 MHz s ispol'zovaniem radioteleskopa GURT [Observations of the type U burst in within 10–70 MHz with the GURT radio telescope]. *Radiofizika i radioastronomia*, **18** (2), 101–106 (2013) [in Russian].

- 3. Konovalenko A. A., Yerin S. M., Bubnov I. M., Tokarsky P. L., Zakharenko V. V., Ulyanov O. M., Sidorchuk M. A., Stepkin S. V., Gridin A. O., Kvasov G. V., Koliadin V. L., Melnik V. M., Dorovskyy V. V., Kalinichenko M. M., Litvinenko G. V., Zarka P., Denis L., Girard J., Rucker H. O., Panchenko M., Stanislavsky A. A., Khristenko O. D., Mukha D. V., Reznichenko O. M., Lisachenko V. M., Bortsov V. V., Brazhenko A. I., Vasylieva I. Y., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Mylostna K. Y. Astrofizicheskie issledovania s pomosch'u malorazmernykh nizkochastotnykh padioteleskopov novogo pokolenia [Astrophysical studies with small low-frequency radio telescopes of new generation]. *Radiofizika i radioastronomia*, **21** (2), 83–131 (2016) [in Russian].
- 4. Mylostna K. Y., Zakharenko V. V. Poisk I issledovanie grozovoi aktivnosti na Saturne I drugikh planetakh Solnechnoi sistemy [Search and study of storm activity on Saturn and other planets of the Solar system]. *Radiofizika i radioastronomia*, **18** (1),12–25 (2013) [in Russian].
- Mylostna K. Y., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Fischer G., Zarka P.,Sidorchuk M. A. Tonkaa vremennaa structura molnii na Saturne [Fine time structure of lightnings on Saturn]. *Radiofizika i radioastronomia*, **19** (1), 10–19 (2014) [in Russian].
- Shkuratov Y. G., Kislyuk V. S., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S. Model'Luny dla proekta «Ukrselena» [Model of the Moon for the project "Ukrselene"]. *Kosm. nauka tehnol.*, Dodatok, **10** (2), 3–51 (2004) [in Russian].
- Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. The new preamplification system for the UTR-2 radio telescope. *Exp. Astron.*, **11** (2), 85–112 (2001).
- Alexander J. K., Kaiser M. L., Novaco J. C., Grena F. R., Weber R. R. Scientific instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 satellite. *Astron. and Astrophys.*, 40, 365–371 (1975).
- 9. Arnold J. R. Ice in the lunar polar regions. *J. Geophys. Res.*, **84**, 5659–5668 (1979).
- 10. *Bass F. G., Fuks I. M.* Wave scattering from statistically rough surfaces. (Pergamon Press, Oxford, New York, 1979).
- Bell M. E., Murphy Tara, Johnston S., Kaplan D. L., Croft S., Hancock P., Callingham J. R., Zic A., Dobie D., Swiggum J. K., Rowlinson A., Hurley-Walker N., Offringa A. R., Bernardi G., Bowman J. D., Briggs F., Cappallo R. J., Deshpande A. A., Gaensler B. M., Greenhill L. J., Hazelton B. J., Johnston-Hollitt M., Lonsdale C. J., McWhirter S. R., Mitchell D. A., Morale M. F.s, Morgan E., Oberoi D., Ord S. M., Prabu T., Shankar N. Udaya, Srivani K. S., Subrahmanyan R., Tingay S. J., Wayth R. B., Webster R. L., Williams A., Williams C. L. Time-domain and spectral properties of pulsars at 154 MHz. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **461** (1), 908–921 (2016).
- 12. Bezvesilniy O. O., Dukhopelnykova I. V., Vinogradov V. V., Vavriv D. M. Retrieving 3-D topography by using a sin-

gle-antenna squint-mode airborne SAR. IEEE *Trans. Geosci. Remote Sens.*, **45** (11), 3574–3582 (2007).

- Bezvesilniy O. O., Vynogradov V. V., Vavriv D. M. Highaccuracy doppler measurements for airborne SAR applications. *Proc. 5th European Radar Conf. October 2008.* P. 29–32 (Amsterdam, The Netherlands, 2008).
- Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., Jolliff B. L. Clementine images of the lunar sample-return stations: refinement of FeO and TiO<sub>2</sub> mapping techniques. *J. Geophys. Res.*, **102** (16), 319–325 (1997).
- Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Zhouck I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 Radio Telescope. Experimental techniques and data processing. *Astrophys. and Space Sci.*, 54(1), 3–36 (1978).
- Burns J. O., Duric N., Taylor G. J., Johnson S. W. Observatories on the Moon. *Sci. Amer.*, 262, 18–25 (1990).
- 17. Burns R. Mineralogical applications of crystal field theory. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
- Bussey D. B., Spudis P. D., Nozette S., Lichtenberg C. L., Raney R. K., Marinelli W., Winters H. L. Mini-RF: Imaging radars for exploring the lunar poles. *Lunar Planet*. *Sci. Conf. 39th.* (LPI Houston, 2008).
- Cecconi B. Goniopolarimetric techniques for low-frequency radio astronomy in space. Huber M. C. E., Pauluhn A., Culhane J. L., Timothy J. G., Wilhelm K., Zehnder A. (Eds). Observing Photons in Space. ISSI *Scientific Reports Ser*. P. 263–277 (Springer, 2010).
- Chertok B. Rockets and people. The Moon Race. NASA SP-2011-4110. (Washington, DC., 2011).
- 21. Clark R. N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon. Science, **326**, 562–564 (2009).
- Condoleo E., Cinelli M., Ortore E., Circi C. Stable orbits for lunar landing assistance. *Adv. Space Res.*, **60** (7), 1404–1412 (2017).
- Crawford I., Joy K. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.*, **372**, id. 20130315 (2014).
- 24. Crawford I. A., Zarnecki J. Astronomy from the Moon. *Astron. Geophys.*, **49**, 2.17–2.19 (2008).
- Crider D. H., Vondrak R. R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits. *J. Geophys. Res.*, 105, 26773–26782 (2000).
- Dessler A. J. Jupiter's magnetic field and magnetosphere. Dessler. A. J. (Ed). Physics of the Jovian magnetosphere P. 1–50 (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- Dyar M. D., Hibbitts C. A., Orlando T. M. Mechanisms for incorporation of hydrogen in and on terrestrial planetary surfaces. *Icarus*, 208, 425–437 (2010).
- Evans J. V., Pettengill G. H. The radar cross-section of the Moon. J. Geophys. Res., 68(17), 5098–5099 (1963).
- Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., Tokarsky P. L. Wide-band high linearity

active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.*, **32** (2), 127–145 (2011).

- Fischman M.A. Sensitivity of a 1.4 GHz Direct-Sampling Digital Radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37 (5), 2172–2180 (1999).
- Fisher G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C., Delcroix M. A giant thunderstorm on Saturn. *Nature*, 475 (7354), 75–77 (2011).
- Freeman J. W., Ibrahim B. Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheets. *The Moon*, 14, 103–114 (1975).
- Furlanetto S. R., Peng O. S., Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe. *Phys. Repts.*, 433 (4–6), 181–301 (2006).
- Garrick-Bethell I., Head J. W., Pieters C. M. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls. Icarus, 212, 480–492 (2011).
- Gault D. E., Adams J. B. Collins R. J., Kuiper G. P., O'Keefe J. A., Phinney R. A., Shoemaker E. M. Lunar theory and processes: Post-sunset horizon "Afterglow". *Icarus*, 12, 230–232 (1970).
- Gordon M. A., Sorochenko R. L. Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Application. (Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2002).
- Goswami J. N., Annadurai M. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon. *Curr. Sci.*, 96 (4), 486–491 (2009).
- 38. Guang-You Fang, Bin Zhou, Yi-Cai Ji, Qun-Ying Zhang, Shao-Xiang Shen, Yu-Xi Li, Hong-Fei Guan, Chuan-Jun Tang, Yun-Ze Gao, Wei Lu, Sheng-Bo Ye, Hai-Dong Han, Jin Zheng, Shu-Zhi, Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission. *Res. Astron. Astrophys.*, 14 (12), 1607–1622 (2014).
- 39. Hapke B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
- 40. Hapke B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. J. Geophys. Res., 106, 10,039–10,073 (2001).
- Hauria E. Y., Saal A. T., Rutherford M. J., Van Orman J. A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **409**, 252–264 (2015).
- Henyey L. C. Greenstein J. L. Diffuse radiation in the galaxy. *Astrophys. J.*, 93, 70–83 (1941).
- Horanyi M., Walch B., Robertson S., Alexander D. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust. J. Geophys. Res., 103E (4), 8575–8580 (1998).
- 44. Howell K. C. Three-dimensional periodic halo orbits. *Celest. Mech.*, **32** (1), 53–71 (1984).
- 45. Irvine W. M. Multiple scattering by large particles. *Astrophys. J.*, **4**, 1563–1575 (1965).
- 46. Jeong M., Choi Y.-J., Kim S. S., Kang K.-I., Shkuratov Y. G., Kaydash V. G., Videen G., Sim C. K., Kim I.-H., Preliminary Design of Wide-Angle Polarimetric Camera for

the First Korean Lunar Mission. *3rd Planetary Data Workshop. LPI Contrib.* N 1986 (2017), 7035.pdf.

- 47. Jester S., Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: from the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron. Rev.*, **53**, 1–26 (2009).
- 48. Jin Weidong, Zhang Hao, Yuan Ye, Yang Yazhou, Lucey Paul, Shkuratov Yuriy, Kaydash Vadim, Zhu Meng-Hua, Xue Bin, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith. *Geophys. Res. Lett.*, **42** (20), 8312–8319 (2015).
- 49. Kaiser M. L. A low-frequency radio survey of the planets with RAE-2. J. Geophys. Res., 82, 1256–1260 (1977).
- Kaydash V., Shkuratov Y., Korokhin V., Videen G. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter. *Icarus*, 211, 89– 96 (2011).
- 51. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G., Phase-ratio imagery as a tool of lunar remote sensing. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **113** (18), 2601–2607 (2012).
- Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Landing of the probes Luna 23 and Luna 24 remains an enigma. *Planet.* and Space Sci., 89, 172–182 (2013).
- 53. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Dark halos and rays of young lunar craters: A new insight into interpretation. *Icarus*, **231**, 22–33 (2014).
- 54. Keller J. W., Petro N. E., Vondrak R. R., and the LRO team. The Lunar Reconnaissance Orbiter Mission Six years of science and exploration at the Moon. *Icarus*, 273, 2–24 (2016).
- 55. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. V., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O. Thirty-elements active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope. *Exp. Astron.*, **16** (3), 149–164 (2003).
- Konovalenko A. A., Sodin L. G. Neutral 14N in the interstellar medium. *Nature*, 283, 360–361 (1980).
- Konovalenko A. A., Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature*, 294, 135–136 (1981).
- 58. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A.,

Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Grieβ-Meier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.*, **42** (1), 11–48 (2016).

- 59. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., A. Lecacheux, G. Mann, J.-L. Bougeret, M. L. Kaiser, C. Briand, P. Zarka, E. P. Abranin, V. V. Dorovsky, A. A. Koval, V. N. Mel'nik, D. V. Mukha, M. Panchenko et al. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope. *Exp. Astron. Astrophys. Instrument. Methods*, **36** (1–2), 137–154 (2013).
- Konovalenko A.A., Stepkin S.V. Radio recombination lines . In: Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky. Eds L. Gurvits, S. Frey, S. Rawlings. – Budapest: EAS Publ. Ser., 15, 271–295 (2005).
- 61. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., Yerin S. N. Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope. *Proc. of the VII-th Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14).* P. 25–29 (Kharkiv, Ukraine, 2014).
- 62. Litvinenko G. V., Shaposhnikov V. E., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Panchenko M., Dorovsky V. V., Brazhenko A. I., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Melnik V. N. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra. *Icarus*, 272, 80–87 (2016).
- Liu Y., Park J. S., Schnare D., Hill E., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: Texture and shape characteristics. *J. Aerospace Eng.*, 21 (4), 272–279 (2008).
- 64. Louis C., Lamy L., Zarka P., Cecconi B., Hess S. L. Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/ RPWS. J. Geophys. Res. Space Phys., 122 (9), 9228–9247 (2017).
- 65. Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon. *Science*, **268**, 1150–1153 (1995).
- Lynn V. L., Sohigian M. D., Crocker E. A. Radar observations of the Moon at a wavelength of 8.6 millimeters. *J. Gephys. Res.*, 69 (4), 781–783 (1964).
- Managadze G. G., Cherepin V. T., Shkuratov Y. G., Kolesnik V. N., Chumikov A. E. Simulating of OH/H<sub>2</sub>O formation by solar wind at the lunar surface. *Icarus*, 215 (1), 449–451 (2011).
- McCoy J. E., Criswell D. R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust. *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th.* P. 2991–3005 (LPI Houston, 1974).
- 69. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A.

Solar sporadic radio emission in the decametre waveband. *Astron. and Astrophys. Trans.* **24** (5), 391–401 (2005).

- Mimoun D., Wieczorek M. A., Alkalai L., Banerdt W. B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H., Flohrer J., Garcia R. F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C. L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konovalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., Lognonné Ph., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan Gr., Zarka Ph. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon. *Exp. Astron.*, 33 (2–3), 529–585 (2012).
- Mitrofanov I. G., Zelenyi L. M., Tret'yakov V. I. Upgraded program of Russian lunar landers: studying of lunar poles. Proc. Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. N 1685, P. 3025 (LPI Contrib., 2012).
- 72. Ono T., Oya H. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. Earth, Planets and Space, 52, 629–637 (2000).
- Park J. S., Liu Y., Kihm K. D., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution. J. Aerospace Eng., 21 (4), 266–271 (2008).
- Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Analytical light-scattering solution for Chebyshev particles. J. Opt. Soc. Amer., A24 (4), 1103–1119 (2007).
- Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Electromagnetic wave scattering from particles of arbitrary shapes. J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer., 112 (11), 1636–1645 (2011).
- 76. Pieters C. M., Goswami J. N., Clark R. N., and the M3 Science Team. Character and spatial distribution of OH/ H2O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1. Science, 326, 568 –572 (2009).
- Pieters C., Shkuratov Y., Kaydash V., Stankevich D., Taylor L. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine image data. Icarus, 184, 83–101 (2006).
- Pinet P. C., Shevchenko V. V., Chevrel S. D., Daydou Y., Rosemberg C. Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma Formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data. J. Geophys. Res. Planets, 105E (4), 9457–9475 (2000).
- 79. Pritchard J. R., Loeb A. Constraining the unexplored period between the dark ages and reionization with observations of the global 21 cm signal. Phys. Rev. D-Part. and Fields, 82, 023006 (2010).
- Popel S. I., Zelenyi L. M. Dusty plasmas over the Moon. J. Plasma Phys., 80 (6), 885–893 (2014).
- Rennilson J. J., Criswell D. R. Surveyor observations of lunar horizon-glow. The Moon, 10, 121–142 (1974).
- 82. Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S. J., Thomas P. C., Denevi B. W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M. A., Caplinger M. A., Ghaemi F. T., Schaffner J. A., Malin M. C., Mahanti P.,

Bartels A., Anderson J., Tran T. N., Eliason E. M., McEwen A. S., Turtle E., Jolliff B. L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview. *Space Sci. Rev.*, **150**, 81–124 (2010).

- 83. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., Denis L. A low-noise, highdynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. and Astrophys.*, **510**, id. A16 (2010).
- Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A, Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. and Astrophys.*, 568, id. A53 (2014).
- 85. Schmitt H. H. Return to the Moon: Exploration, Enterprise, and Energy in the Human Settlement of Space (Springer-Verlag, Copernicus books, NY, 2006).
- Scolnik M. I. Radar Handbook (McGraw-Hill Book Company, New York, 1989).
- Severny A. B., Terez E. I., Zvereva A. M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2. *The Moon*, 14, 123–128 (1975).
- Shkuratov Y., Starukhina L., Kreslavsky M., Opanasenko N., Stankevich D., Shevchenko V. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies. *Icarus*, **109**, 168–190 (1994).
- Shkuratov Y., Lytvynenko L., Shulga V., Yatskiv Y., Vidmachenko A., Kislyuk V., Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon. *Adv. Space Res.*, **31** (11), 2341–2345 (2003).
- 90. Shin-ichi Sobue, Hayato Okumura, Susumu Sasaki, Manabu Kato, Hironori Maejima, Hiroyuki Minamino, Satoru Nakazawa, Hisashi Otake, Naoki Tateno, Hisashi Konishi, Katsuhide Yonekura, Hoshino Hirokazu, Jun Kimura. The project highlight of Japan's Lunar Explorer Kaguya (SELENE). *Lunar Planet. Sci. Conf. 40th.* (LPI Houston, 2009) 1224.pdf.
- Shkuratov Y., Kaydash V., Korokhin V., Velokodsky Y., Opanasenko N., Videen G. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planet. and Space Sci.*, 59, 1326–1371 (2011).
- 92. Shkuratov Y., Kaydash V., Sysolyatina X., Razim A., Videen G. Lunar surface traces of engine jets of Soviet sample return probes: the enigma of the Luna-23 and Luna-24 landing sites. *Planet. and Space Sci.*, 75, 28–36 (2013).
- Shkuratov Y., Kaydash V., Videen G. The crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery. *Icarus*, 218 (1), 525–533 (2012).
- 94. Shkuratov Y. G., Stankevich D. G., Petrov D. V., Pinet P. C., Cord A. M., Daydou Y. H. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: shadowing and multiple scatter. *Icarus*, **173**, 3–15 (2005).

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

- 95. Stanislavsky A., Konovalenko A., Rucker H., Abranin E., Kaiser M., Dorovskyy V., Mel'nik V., Lecacheux A. Antenna performance analysis for decameter solar radio observations. *Astron. Nachr.*, **330**, 691–697 (2009).
- 96. Stankevich D., Shkuratov Y. Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure. J. *Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, 87 (3–4), 289–296 (2004).
- 97. Starukhina L. V., Shkuratov Y. G., The lunar poles: water ice or chemically trapped hydrogen? *Icarus*, **147**, 585– 587 (2000).
- 98. Starukhina L. V., Shkuratov Y. G. Swirls on the Moon and Mercury: meteoroid swarm encounters as a formation mechanism. *Icarus*, **167** (1), 136–147 (2004).
- Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 374 (3), 852–856 (2007).
- 100. Stubbs T., Vondrak R., Farrell W. A Dynamic fountain model for lunar dust. Lunar Planet. Sci., 36 (2005). — Retrieved from http://www.lpi.usra. edu/meetings/ lpsc2005/pdf/1899.pdf.
- 101. Sun Huixian, Wu Ji, Dai Shuwu, Zhao Baochang, Shu Rong, Chang Jin, Wang Huanyu, Zhang Xiaohui, Ren Qiongying, Chen Xiaomin, Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao. Introduction to the payloads and the initial observation results of Chang'E-1. Chin. J. Space Sci. 28 (5), 374—384 (2008).
- 102. Sunshine J. M., Farnham T. L., Feaga L. M., Groussin O., Merlin F., Milliken R. E., A'Hearn M. F. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact Spacecraft. *Science* **326**, 565–568 (2009).
- 103. Taylor L. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances. Eng. Constr. and Operations in Space IV, ASCE Publication, Proceedings of Space, 94, 678–686 (1994).
- 104. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N. Sensitivity of an active antenna array element for the low-frequency radio telescope GURT. *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, **65** (9), 4636–4644 (2017).
- 105. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Seredkina A. A. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere. *Proc. of the International Astronomical Union*, 8 (S291), 530–532 (2012).
- 106. Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosole C., Rucker H. O. Detection of individual pulses from pulsars B0809+74; B0834+06; B0950+ 08; B0943+10; B1133+16 in the decameter waves range. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **11**, 113–133 (2006).
- 107. Vaniman D., French B., Heiken G. Afterword. Lunar Sourcebook. Heiken G. H., Vaniman D. T., French B. M. (Eds). P. 633–641 (Chapter 11) (Cambridge University Press, NY, 1991).
- 108. Vasilyev O. Y., Kuzin A. I., Kravtsov A. A., Bulakh E. V., Vynogradov V. V., Vavriv D.M. Multifunctional digital

receiver-spectrometer. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **19** (3), 276–289 (2014).

- 109. Vondrak R., Keller J., Russell C. (Eds) Lunar Reconnaissance Orbiter Mission (Springer, NY, 2010).
- 110. Walmsley C. M., Watson W. D. The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon. *Astrophys. J.*, **260**, 317–325 (1982).
- 111. Wittenberg L., Santarius J., Kulchinski G. Lunar source of <sup>3</sup>He for fusion power. *Fusion Technol.*, **10**, 167–178 (1986).
- 112. Yan Su, Guang-You Fang, Jian-Qing Feng, Shu-Guo Xing, Yi-Cai Ji, Bin Zhou, Yun-Ze Gao, Han Li, Shun Dai, Yuan Xiao and Chun-Lai Li Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar. *Res. Astron. Astrophys.*, **14** (12), 1623–1632 (2014).
- 113. Yocky D. A., Wahl D. E., Jakowarz C. V. (Jr.) Terrain elevation mapping results from airborne spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, **42**, 301–308 (2004).
- 114. Zakharenko V. V. Sporadic radio emissions from celestial sources: studies at decameter wavelengths. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **2** (4), 287–298 (2011).
- 115. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V. Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT. J. Astron. Instrument., 5 (04), id.1641010 (2016).
- 116. Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Fischer G., KonovalenkoA.A., Zarka P., Grieβmeier J.-M., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Ryabov V. B., Rucker, H., Ravier P., Sidorchuk M. A., Cecconi, B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Kozhyn R. V., Mukha D. V., Pallier L., Schneider J., Shevchenko V. A., Vinogradov V. V., Weber R., Nikolaenko V. S. Identification of Saturn lightings recorded by the UTR-2 radio telescope and Cassini spacecraft. *Radio Phys. and Radio Astron.*, 2(2), 93–98 (2011).
- 117. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Grieβmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., Nikolaenko V. Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2. Europ. Planet. Sci. Congress, 23–28 September 2012. Madrid, Spain., id. EPSC2012-186 (2012). — Retrieved from http://meetings.copernicus. org/ epsc2012.
- 118. Zakharenko V. V., Nikolaenko V. S., Ulyanov O. M., Motiyenko R. A. A high time resolution receiver for radio emission investigation. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **12** (3), 233–242 (2007).
- Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Grieβmeier J. M., Cognard I., Nikolaenko V. S. Detection of decametre-

wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **431** (4), 3624–3641 (2013).

- 120. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Grieβmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Konovalenko A., Lamy L., Mimoun D., Aminaei A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the *Moon. Planet. Space Sci.*, 74, 156–166 (2012).
- 121. Zebker H. A., Goldstein R. M. Topographic mapping from interferometric SAR observations. J. Geophys. Res., 91B(5), 4993–4999 (1986).
- 122. Zhang Hao, Yang Yazhou, Jin Weidong, Yuan Ye, Lucey Paul, Zhu Meng-Hua, Kaydash Vadim, Shkuratov Yuriy, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei, Xue Bin. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophys. Res. Lett.*, **42** (17), 6945–6950 (2015).
- 123. Zook H., Potter A., Cooper B. The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow. *Lunar Planet. Sci.*, 26, 1577–1578 (1995).
- 124. Zubko E., Shkuratov Yu., Kiselev N., Videen G. DDA simulations of light scattering by small irregular particles with various structure. J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer., 101, 416–434 (2006).
- 125. Zubko E., Shkuratov Yu., Mishchenko M., Videen G. Light scattering in a finite multi-particle system. J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer., 109, 2195–2206 (2008).
- 126. Zubko E., Weinberger A., Zubko N., Shkuratov Y., Videen G. Umov effect in single-scattering dust particles: Effect of irregular shape. *Opt. Lett.*, **42** (10), 1962–1965 (2017). *Received 21.12.17*

Ю. Г. Шкуратов<sup>1,2</sup>, А. А. Коноваленко<sup>1</sup>, В. В. Захаренко<sup>1,2</sup>,

- А. А. Станиславский <sup>1,2</sup>, Е. Ю. Банникова <sup>1,2</sup>,
- В. Г. Кайдаш<sup>2</sup>, Д. Г. Станкевич<sup>2</sup>, В. В. Корохин<sup>2</sup>,
- Д. М. Ваврив<sup>1</sup>, В. Г. Галушко<sup>1</sup>, С. Н. Ерин<sup>1</sup>, И. Н. Бубнов<sup>1</sup>,
- П. Л. Токарский <sup>1</sup>, О. М. Ульянов <sup>1</sup>, С. В. Степкин <sup>1</sup>,
- Л. Н. Литвиненко <sup>1</sup>, Я. С. Яцкив <sup>3</sup>,
- Г. Видин<sup>4</sup>, Ф. Зарка<sup>5</sup>, Г.О. Рукер<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

- <sup>2</sup> Институт астрономии Национального университета имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина
- <sup>3</sup> Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина
- <sup>4</sup> Space Science Institute, Boulder, USA
- <sup>5</sup> LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, Université Paris-Diderot, Paris, France

<sup>6</sup> Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

### УКРАИНСКАЯ МИССИЯ НА ЛУНУ: ЦЕЛИ И ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА

Научно-технический потенциал Украины в сотрудничестве с другими заинтересованными странами позволяет

подготовить космическую миссию с полезной нагрузкой для исследования Луны. В статье рассматриваются подробности такой миссии, которая состоит из двух частей: 1) орбитальное исследование с использованием вытянутой орбиты с перицентром над северным полюсом (100 км над поверхностью) и апоцентром над южным полюсом (высота примерно 3000 км); 2) исследование с помощью посадочного модуля на обратной стороне Луны вблизи южного полюса в окрестностях кратера Брауде. Посадочный модуль, имеющий в своем составе пять дипольных антенн, позволит выполнить разнообразные радиоастрономические наблюдения от сотен кГц до 40 МГц. Панорамная камера посадочного модуля с цветными и поляризационными фильтрами обеспечит наблюдения горизонта с целью исследований сияния, вызванного эффектом электростатической левитации лунной пыли. Для картирования структурных и минералогических характеристик молодых поверхностных образований предлагается камера HiRes в двух спектральных полосах. Трехмиллиметровый радар в режиме бокового обзора позволит построить карты не только радиояркости поверхности, характеризующие ее шероховатость, но и улучшить лунную топографическую модель.

*Ключевые слова:* радиоизлучения астрофизических объектов, низкочастотная радиоастрономия, космические миссии, лунную пыль, сияние горизонта вблизи полюса, мода растяжения, изображение фазового отношения, карта радиояркости поверхности.

- Y. G. Shkuratov <sup>1,2</sup>, A. A. Konovalenko <sup>1</sup>, V. V. Zakharenko <sup>1,2</sup>,
- A. A. Stanislavsky <sup>1,2</sup>, E. Y. Bannikova <sup>1,2</sup>, V. G. Kaydash <sup>2</sup>,
- D. G. Stankevich<sup>2</sup>, V. V. Korokhin<sup>2</sup>, D. M. Vavriv<sup>1</sup>,
- V. G. Galushko<sup>1</sup>, S. N. Yerin<sup>1</sup>, I. N. Bubnov<sup>1</sup>, P. L. Tokarsky<sup>1</sup>,
- O. M. Ulyanov<sup>1</sup>, S. V. Stepkin<sup>1</sup>, L. N. Lytvynenko<sup>1</sup>,
- Y. S. Yatskiv<sup>3</sup>, G. Videen<sup>4</sup>, P. Zarka<sup>5</sup>, H. O. Rucker<sup>6</sup>
- <sup>1</sup> Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
- <sup>2</sup> Institute of Astronomy, V. N. Karazin National University, Kharkiv, Ukraine
- <sup>3</sup> Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine
- <sup>4</sup> Space Science Institute, Boulder, USA
- <sup>5</sup> LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, Université Paris-Diderot, Paris, France
- <sup>6</sup> Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

### UKRAINIAN MISSION TO THE MOON: HOW TO AND WITH WHAT

Ukrainian scientific and technical potential in collaboration with other interested countries allows constructing a spacecraft with the payload for exploration of the Moon. In this paper we consider details of such a mission that includes two parts: 1) orbiter exploration from an elongated orbit with a pericenter over the north pole (100 km above the surface) and the apocenter over the south pole (altitude about 3000 km), and 2) exploration with a lander located on the lunar farside near the south pole in the vicinity of the Braude crater. The lander will contain five dipole antennas for various radio astronomy observations from hundreds of kHz to 40 MHz. The lander panoramic camera equipped with color and polarization filters will provide useful observations of horizon glow due to the electrostatic levitation effect of the lunar dust. A

HiRes camera operating in two spectral bands is suggested for mapping structural and mineralogical characteristics of young surface formations. Working in a squint mode, the 3-mm radar will map the Moon surface in radio brightness, characterizing its roughness, to improve the lunar topographic model.

*Keywords:* radio emission of astrophysical objects, low frequency radio astronomy, space missions, lunar dust, horizon glow near the pole, stretching mode, phase ratio image, brightness map of the surface. doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2018.01.031

УДК 524.834

### І.Б. Вавилова

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

## ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ: ПЕРЕВІРКИ В НАЗЕМНИХ І КОСМІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ

Подається короткий огляд експериментів з перевірки ефекту гравітаційного червоного зміщення (ГЧЗ) у наземних і космічних експериментах. Зокрема, розглянуто ефект ГЧЗ у гравітаційному полі Землі, великих планет Сонячної системи, компактних зір (білі карлики і нейтронні зорі), де ефект підтверджується з великою точністю. Окремо обговорюються можливості перевірки ефекту ГЧЗ для галактик і скупчень галактик в оптичному і рентгенівському діапазоні електромагнітного спектру.

**Ключові слова:** гравітаційне червоне зміщення, загальна теорія відносності, навігаційні системи, компактні зорі, скупчення галактик.

#### ВСТУП

Астрономічне червоне зміщення частоти електромагнітної хвилі, яку реєструє спостерігач, пов'язане з рухом небесного тіла. Частота хвилі зменшується, коли об'єкт віддаляється від спостерігача, та збільшується, коли об'єкт наближається, а спектральні лінії відповідно зсуваються у червону (довгохвильову) частину спектру або у синю (короткохвильову), зберігаючи при цьому своє відносне розташування. Зсув спектральних ліній у червоний бік (зумовлений віддаленням об'єкта) називається «червоним зміщенням». Є три типи червоних зміщень: червоне зміщення в результаті ефекту Допплера, гравітаційне червоне зміщення, космологічне червоне зміщення. Допплерівське зміщення спектральних ліній спричиняється відносним радіальним рухом між спостерігачем і небесним об'єктом, що спостерігається. Гравітаційне червоне зміщення виникає, коли фотони випромінювання небесного тіла

втрачають енергію, долаючи гравітаційне поле. Космологічне червоне зміщення спричиняється релятивістським розширенням Всесвіту і пов'язане з постійною Габбла  $H_0$ . У загальному випадку червоне зміщення можна представити як суму цих величин.

Зокрема червоне зміщення *z* спектральних ліній в результаті ефекту Допплера (відкритий у 1842 р.) при швидкості небесного тіла, яка становить до 10 % від швидкості світла, дорівнює

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_e} = \frac{\nu}{c}, \qquad (1)$$

а у релятивістському випадку (для червоних зміщень  $z \ge 0.1$ ):

$$z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1 , \quad \frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} , \quad (2)$$

де  $\lambda_o$  — довжина хвиля, яка реєструється («observed») спостерігачем,  $\lambda_e$  — довжина хвилі, яка випромінюється («emitted») небесним тілом,  $\nu$  — швидкість небесного тіла, c — швидкість світла. Таким чином, для небесних тіл, які спо-

<sup>©</sup> І. Б. ВАВИЛОВА, 2018

стерігаються на великих червоних зміщеннях, УФ-випромінювання зміщується в ІЧ-діапазон, а ІЧ-випромінювання — у радіодіапазон.

Гравітаційне червоне зміщення (ГЧЗ) для фотонів, які втрачають енергію на подолання гравітації, записується у такий спосіб:

$$z_g = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1/2} - 1, \qquad (3)$$

де G — гравітаційна стала, M — маса небесного тіла, r — відстань до небесного тіла. Зокрема, ефект ГЧЗ для променя світла, що проходить край Сонця, становить приблизно 2 · 10<sup>-6</sup>. Принагідно зазначимо, що однією з перевірок Загальної теорії відносності (ЗТВ) Альберт Ейнштейн вважав вимірювання відхилення променів світла зір у 1.75 дугових секунд у полі тяжіння Сонця. Це передбачення ЗТВ було підтверждено в експерименті Артура Еддінгтона під час повного затемнення Сонця у 1919 р.

Космологічне червоне зміщення пов'язане з «розтягуванням» простору-часу, а не з радіальними рухами небесних тіл, і домінує для об'єктів Всесвіту за межами Місцевої групи галактик. Світло, що рухається в цьому просторі-часі, також буде «розтягуватися», а його довжина хвилі збільшуватися («червонішати»). За даними космічної обсерваторії WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), яка вела спостереження реліктового мікрохвильового випромінювання (T = 2.7250 K), були уточнені, зокрема, постійна Габбла  $H_0$ , яка є мірою розширення Всесвіту ( $H_0 = 71 (км/c)/Мпк$ ); червоне зміщення реліктового мікрохвильового випромінювання ( $z_{CMB} = 1089$ ); вік Всесвіту ( $\approx 13.8$  млрд років). Найвіддаленіші галактики, які ми можемо спостерігати сучасними засобами, мають червоне зміщення близько z = 10, що означає, що світло від них йшло 13.18 млрд років. Із рівняння (2) можна отримати швидкість реліктового мікрохвильового випромінювання в одиницях швидкості світла, яка дорівнює 0.9999983 с.

#### ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ

Альберт Ейнштейн вважав ефект гравітаційного червоного зміщення або гравітаційного зсуву частоти спектральних ліній атома одним із найважливіших ефектів для перевірки Загальної теорії відносності [6, 29]. Пізніше з'ясувалася значущість ефекту ГЧЗ для перевірок ейнштейнівського принципу еквівалентності<sup>1</sup> [7], а саме його третього складника — *принципу локальної позиційної інваріантності*: ефект ГЧЗ є однаковим у будьякій метричній теорії<sup>2</sup>, що має правильну ньютонівську границю <sup>3</sup>. Тобто, у певній системі координат згідно з *принципом відповідності* наближена формула для метричного тензора  $g_{00}$  має вигляд

$$g_{00} \approx 1 + \frac{2U}{c^2}$$
, (4)

де U — ньютонівський гравітаційний потенціал. Це співвідношення повинне виконуватися у лінійному за величиною  $U/c^2$  наближенні та є необхідною і достатньою умовою, щоб рівняння руху пробних тіл мали ньютонівську границю при  $U/c^2 << 1$ .

Ефект ГЧЗ базується на залежності частоти фотона від потенціалу гравітаційного поля  $U_2$  і проявляє себе, коли приймач фотона світла перебуває в області з меншим гравітаційним потенціалом  $U_1$ . Якщо виключити звичайний ефект Допплера, залежний від швидкості, то виміряна спостерігачем частота випромінювання атома

Принцип локальної позиційної інваріантності (ПЛПІ) результат будь-якого негравітаційного локального експерименту не залежить від того, де і коли у Всесвіті він проводиться (зокрема, значення фундаментальних фізичних констант не змінюється ні з часом, ні у просторі).

<sup>2</sup> Теорія гравітації є метричною, якщо безпосередній вплив гравітаційного поля на динаміку тіл та інших фізичних полів описується лише через метричний тензор. Тоді параметри інших полів, що можуть брати участь в описі гравітації, входять до рівнянь, що визначають метрику (саме цими рівняннями метричні теорії гравітації різняться одна від одної).

<sup>3</sup> Існування ньютонівської границі для експериментів у слабкому гравітаційному полі є так званим принципом відповідності.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Принцип еквівалентності має три складники:

Слабкий принцип еквівалентності (СПЕ) — траєкторія незарядженого пробного тіла залежить тільки від його початкового положення і початкової швидкості та не залежить від його внутрішнього складу (структури).

Принцип локальної лоренц-інваріантності (ПЛЛІ) — результат будь-якого негравітаційного локального експерименту не залежить від швидкості лабораторії, яка вільно падає.

 $\omega_1$ , який перебуває в гравітаційному полі масивного небесного тіла, буде меншою за виміряну частоту випромінювання атома  $\omega_2$  цього самого елемента, який перебуває у вільному просторі, тобто  $\omega_2 - \omega_1 > 0$  (зміщення вимірюваної частоти атома у червону ділянку електромагнітного поля під дією гравітаційного поля). Зміщення може відбуватися і у фіолетову частину спектру, якщо спостерігач перебуває у сильнішому гравітаційному полі, ніж джерело.

Фактично ГЧЗ — це той самий ефект, що й гравітаційне уповільнення часу: що сильніше гравітаційне поле, то більшим є уповільнення часу (спостерігач, який перебуває у місці з іншим гравітаційним потенціалом, буде інтерпретувати зсув частот як зміну ходу часу).

Ейнштейн отримав формулу ефекту ГЧЗ, користуючись законом збереження енергії. А саме, в статичному гравітаційному полі

$$[g_{00}(r)]^{1/2} E_{\text{JOK}} = \text{const},$$

де  $E_{\text{лок}} = hc/\lambda_{\text{лок}}$  — локально виміряна енергія частинки,  $\lambda_{\text{лок}}$  — локально виміряна довжина її хвилі,  $h = 6.625 \cdot 10^{-34} \,\text{Дж-с}$  — стала Планка. У такій формі закон збереження енергії справедливий для частинок з нульовою (фотон) і ненульовою масою спокою. Звідси  $\lambda_{\text{лок}}(g_{00})^{-1/2} =$ = const, або

$$1 + z = \left[\frac{g_{00}^{(1)}}{g_{00}^{(2)}}\right]^{1/2},$$
 (5)

де  $z_g$  — гравітаційне червоне зміщення. Такий самий результат випливає в усіх метричних теоріях із розгляду власного часу для нерухомих випромінювача та спостерігача у статичному полі тяжіння. Звідси, у випадку слабкого гравітаційного поля, використовуючи наближену формулу (4) для  $g_{00}$ , дістанемо

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \approx -\frac{U_1 - U_2}{c^2},\tag{6}$$

де  $\omega$ , U — частота випромінювання і потенціал поля у відповідних точках. Цю формулу легко отримати як результат збереження енергії: фотони втрачають частину своєї енергії  $E = h\omega$  на подолання гравітації, і їхня частота зменшується. При цьому неявно використовується припущення про рівність інертної та гравітаційної маси фотона.

На якісному рівні ефект ГЧЗ відіграє принципову роль для з'ясування факту викривленості простору-часу. Розглянувши світові лінії двох частинок, що перебувають у спокої відносно статичного гравітаційного поля та обмінюються світловими сигналами, Шилд [51] помітив, що ефект ГЧЗ є несумісним з геометрією простору-часу Мінковського. Це можна інтерпретувати як свідчення викривленості простору-часу (див. також відповідні розділи у книзі [5]).

## ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ПОЛІ ЗЕМЛІ

Ефект ГЧЗ (і, разом із тим, принцип локальної позиційної інваріантності) у полі Землі стало можливим ефективно перевірити лише у 1960-1965 роках у серії експериментів Паунда — Ребки — Снайдера [43, 44]. Перевірка полягала у вимірюванні зсуву частоти між двома однаковими стандартами частоти (атомними годинниками), розташованими на різних висотах над поверхнею. Власна частота кожного із атомних годинників у локальній лоренцевій системі відліку не залежить від положення і швидкості цієї системи відліку. Порівняння частот двох атомних годинників, розташованих на різних висотах, відповідає порівнянню швидкостей двох локальних лоренцевих систем відліку. А саме, одна з них пов'язана з годинником під час випромінювання його сигналу, а друга система відліку — з другим годинником у час прийому цього сигналу. Якщо в такому експерименті буде зареєстровано зсув частоти між двома атомними годинниками, то це є наслідком допплерівського зсуву першого порядку між двома локально лоренцевими системами відліку. Якщо принцип локальної позиційної інваріантності порушується, то зміщення частот відбуватиметься не за формулою (6), а за формулою

$$z_{\sigma} = (1 + \alpha) \,\Delta U/c^2, \tag{7}$$

де α — тестовий параметр принципу локальної позиційної інваріантності, що характеризує го-

динник, зсув частоти якого вимірюється. Він може бути ненульовим і залежним від типу годинника при відхиленні від принципів метричних теорії.

Постановка експериментів Паунда — Ребки — Снайдера, як і багатьох подальших експериментів з перевірки принципу локальної позиційної інваріантності, стала можливою завдяки відкриттю ефекту Мессбауера у 1959 р. У зазначених експериментах ефект Мессбауера було використано для оцінки впливу однорідного гравітаційного поля на зміщення вузької резонансної лінії поглинання, утвореної фотонами гаммапроменів з енергією 14.4 кеВ від ізотопу <sup>57</sup>Fe. Випромінювач і поглинач гамма-променів були встановлені у стані спокою в підземній частині і нагорі башти Джеферсонівської фізичної лабораторії Гарвардського університету (h = 22.5 м). Отже, ефект ГЧЗ, який на основі принципу еквівалентності становив (і з урахуванням величини прискорення вільного падіння у місці проведення експерименту і висоти башти)  $\Delta\lambda/\lambda = 2gh/c^2 =$  $= 4.9 \cdot 10^{-15}$ , було підтверджено з точністю до 1 % [39]. Таким чином, довжина хвилі фотонів залежить лише від властивостей атомів (або ядер), які їх випромінюють. Це так само стосується і вимірювання часу атомними годинниками. Варто зазначити, що в цих експериментах оцінці підлягала саме відмінність власного часу Δτ двох атомних годинників або двох локальних лоренцевих систем відліку (див. [5, С. 399].

Іншу серію експериментів з перевірки ГЧЗ, обумовленого гравітаційним полем Землі, було виконано у 1960—1970 рр. із використанням атомних годинників, встановлених на літаках, ракетах і космічних апаратах (КА). Зокрема в експерименті Оллея та ін. [13] різниця у показі часу двох ідентичних атомних годинників, встановлених у спеціальному пристрої, вимірювалася до і після того, як один із пристроїв транспортувався на літаку в супроводі радіолокатора упродовж 15 год на висоті 10 км (у ході експерименту було виконано п'ять незалежних польотів). Наростання різниці часу Δτ у показах годинників реєструвалося телеметрично за допомогою лазерних імпульсів тривалістю 0.1 нс. Теоретична оцінка різниці часу становила  $\Delta \tau_{\text{теор}} = 47.1 \pm 0.25$  нс, і у результаті експерименту було отримано  $\Delta \tau_{\text{вимір}} / \Delta \tau_{\text{теор}} = 0.987 \pm 0.010.$ 

Більш точну оцінку параметра  $\alpha$  з формули (7) було отримано наприкінці 1970-х років в експерименті Вессо — Левіна [58, 59] з вимірювання ГЧЗ у полі Землі. Частота воднево-мазерного годинника, встановленого на ракеті, порівнювалася з годинниками, встановленими у наземній лабораторії. Висота підйому ракети становила 10000 км. Це був перший спеціалізований космічний проект (місія «Gravity Probe A»), призначений для перевірок ЗТВ і фундаментальних положень фізики взагалі. Експеримент показав високу точність ефекту ГЧЗ  $|\alpha| < 1.4 \cdot 10^{-4}$ .

Серед цікавих інших перевірок принципу локальної позиційної інваріантності відзначимо насамперед «нульовий» експеримент із порівняння відносних ходів різних типів годинників у залежності від їхнього місцезнаходження, який було проведено у квітні 1976 р. у Стенфордському університеті (див. зокрема огляд [42]). Ідея полягала у використанні факту, що варіація сонячного гравітаційного потенціалу  $\Delta U/c^2$  має два компоненти: синусоїдальний із 24-годинним періодом і амплітудою 3 · 10<sup>-13</sup>, викликаний обертанням Землі, та лінійний з темпом  $3 \cdot 10^{-12}$  на добу, обумовлений рухом Землі по орбіті. Для оцінки параметра α було використано систему з двох воднево-мазерних годинників (ВМГ) та трьох генераторів, стабілізованих надпровідним контуром (ГСНК). Відхилень від принципу локальної позиційної інваріантності у межах тестового параметра  $|\alpha^{BM\Gamma} - \alpha^{\Gamma CHK}| < 2 \cdot 10^{-2}$  знайдено не було (цю точність в 1995 р. покращили Годон та ін. [30]).

Врахування поправок за ГЧЗ і уповільнення часу стало необхідним елементом міжнародних Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), GPS, європейська GALILEO, російська ГЛОНАСС та ін., а також при розгляді задач астрономії та геодезії ([10, 15], див. також відповідні розділи в роботах [1, 4, 8, 9]). Якщо не враховувати ефекти спеціальної і загальної теорій відносності, то розбіжність показів між бортовими і наземними годинниками сягає 39 мкс за добу, що може призводити до втрати точності позиціювання у декілька кілометрів за добу. Цей ефект було підтверджено ще у 1972 р. в експерименті Хейфела — Кетінга [32]. Упродовж цього експерименту в жовтні 1971 р. чотири цезієві атомні годинники були встановлені на літаках двічі (перший раз — у польотах у напрямку на схід, другий раз — у напрямку на захід). Наземні годинники знаходилися в Морській обсерваторії США. Передбачення ЗТВ, що бортові годинники повинні запізнюватися на 40 ± 23 нс у русі на схід і випереджати наземні годинники на 275 ± 21 нс у русі на захід, були підтверджені з високою точністю.

Подальші перевірки за допомогою Глобальної позиційної системи GPS, які відповідали гравітаційному червоному зміщенню у системі синхронізації, були проаналізовані щодо часових даних із GPS для підтвердження інших перевірок. Дані першого з супутників, який показав прогнозовану зміну у 39 мікросекунд на день, підтвердили, що ця швидкість розбіжності достатня, щоб суттєво погіршити функціонування GPS протягом години, якщо цю похибку не враховувати. Про роль, яку відіграє ЗТВ при розробці GPS, докладно виклав Ашбай у 2003 р. [16].

Побіжно зазначимо, що експерименти з перевірки ГЧЗ, зокрема з атомними цезієвими годинниками, привернули увагу астрономів, і на початку 1990-х років були ініційовані теоретичні дослідження із запровадження нової просторовочасової метрики для міжнародних систем відліку (у т. ч. барицентричних і геоцентричних) та шкали власного часу (Міжнародного атомного часу TAI). У 2000 р. ці поправки були враховані в Резолюціях Міжнародного астрономічного союзу щодо міжнародних систем відліку (див. зокрема [4, 8, 9, 31] та "IAU Resolutions adopted at the 24th General Assembly (Manchester, August 2000)" (http://syrte.obspm.fr/IAU\_resolutions/Resol-UAI.htm.3).

Отже, на сьогодні основною концепцією всіх глобальних навігаційних супутникових систем є синхронізація годинників, яка базується на локально інерційній системі відліку, що вільно падає разом із Землею. Ця концепція цілком підтверджується успіхом навігаційних систем, які зараз використовуються у різних галузях економіки країн та побуті людей.

На завершення цього розділу відмітимо, що у 2018 р. заплановано провести унікальний метрологічний експеримент із атомними лазер-охолоджуваними годинниками «Atomic Clocks Ensemble in Space» (ACES/PHARAO) на Міжнародній космічній станції (МКС) (див. детальний опис у роботах ([24, 38, 41]). Передбачається, що їхня стабільність становитиме  $5 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$ , що відповідає точності вимірювання частоти ансамблю годинників у 10<sup>-16</sup>. Корисне навантаження для цього експерименту буде запущено ракетою «Space Х» і приєднано до Європейського модуля «Columbus» МКС, тривалість експерименту становитиме 18 місяців із можливим продовженням до 3 років). Цезієвий охолоджуваний атомний годинник (PHARAO) і водневий мазер (SHM) дозволять порівнювати час і частоту з годинниками на Землі завдяки спеціальному мікрохвильовому (лазерному) зв'язку MicroWave Link. Такий зв'язок є принциповою особливістю цього експерименту, — частина наземних терміналів, які будуть приймати сигнали, буде рухатися під час польоту годинників ACES, частина буде нерухомими і розташовуватися у метрологічних лабораторіях (Центр аналізу даних вже створено в Паризькій обсерваторії, SYRTE). Хоча принцип еквівалентності і гравітаційне червоне зміщення годинників пов'язані між собою, їхня перевірка буде здійснюватися окремо. Вважається, що космічний експеримент ACES/PHARAO здатний покращити результати експериментів проекту «Gravity Probe А» [58, 59] та на супутнику MICROSCOPE (у 2017 р. слабкий принцип еквівалентності з вимірювання параметра Етвоша перевірено з точністю  $10^{-14}$  [54]) на два порядки.

## ПЕРЕВІРКИ ЕФЕКТУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ У СОНЯЧНІЙ СИСТЕМІ

Декілька важливих експериментів було виконано для перевірки ефекту ГЧЗ під дією гравітаційного поля планет Сонячної системи і Сонця (див. зокрема [2, 3, 6, 61—63]).

Свого часу Ейнштейн оцінив, що для Сонця значення гравітаційного червоного зміщення у ньютонівському наближенні складає приблизно

 $2 \cdot 10^{-6}$  довжини хвилі. Цю оцінку можна отримати з формули (3): для сферично-симетричного небесного тіла з масою M і радіусом R вона набуває вигляду

$$z_{g} = (1 - r_{g} / R)^{-1/2} - 1, \qquad (8)$$

нагадаємо, що параметр  $r_g = 2GM/c^2$  має розмірність довжини. Для Сонця  $r_g = 3$  км,  $z_g \approx 2 \cdot 10^{-6}$  [7]. Зокрема, для довжини хвилі  $\lambda = 500$  нм отримуємо  $\Delta\lambda \approx 10^{-3}$  нм.

Визначення ефекту ГЧЗ для Сонця ускладнено через ефект Допплера, а саме допплерівські внески першого порядку, які залежать від місця на Сонці, де перебуває джерело випромінювання. Це пов'язано, насамперед, зі значними конвективними рухами (гарячі потоки — на поверхню, холодні — до нижчих шарів атмосфери), які спричинюють допплер-ефект у фіолетову частину спектру. Зокрема, допплерівська півширина лінії атома водню, яка в умовах сонячної фотосфери у п'ятнадцять разів більша за лабораторну, сильно маскує ГЧЗ. Проте у 1962 р. Броулту [22], аспіранту проф. Дікке, за допомогою спеціально сконструйованого фотоелектричного спектрометра з досить вузькою щілиною, вдалося виміряти ГЧЗ потужної спектральної лінії натрію  $D_1$  ( $\lambda = 589.5923$  нм), що утворюється у високих шарах фотосфери Сонця. Ефект ГЧЗ для цієї лінії  $z_g = \Delta \lambda / \lambda = GM_{\odot}/R_{\odot}c^2$  було підтверджено з точністю до 5 %. Пізніше в експерименті з вимірювання ГЧЗ для триплету лінії кисню в інфрачервоній ділянці спектру лімба Сонця була досягнута точність 2 %. Так само точність вимірювання сонячного ГЧЗ за допомогою атомних годинників, встановлених на КА «Галілео», становила 1 %.

Вивчення гравітаційного червоного зміщення — відносне збільшення довжини хвилі в гравітаційному полі Сонця — все ще залишається важливим предметом досліджень сучасної фізики і дискусії, чи можуть атомні інтерферометричні експерименти застосовуватися для гравітаційного вимірювання червоного зміщення. Окремі відповіді на це запитання можна знайти зокрема в статті Вілгелма та Двіведі [60]. А саме, в ній аналізуються базисні положення атомної фізики та параметри інтерферометрів, задіяних у таких експериментах, і доводиться, що відношення гравітаційної до електростатичної сил, як правило, досить маленьке. Автори пишуть: «гравітаційна сила, що діє на електрон у атомі водню, розташований у фотосфері Сония, до електростатичної сили між протоном і електроном становить приблизно 3 · 10<sup>-21</sup>. Порівняння цього співвідношення із прогнозованим і спостережуваним сонячним червоним зміщенням показує розбіжність багатьох порядків. Отже, якщо розглядати припущення Ейнштейна щодо частоти спектральних ліній, яка залежить тільки від самого генеруючого іона як відправної точки, тоді рішення можна сформулювати на основі двоетапного процесу, аналогічно підходу Фермі щодо доплерівського ефекту. Цей підхід забезпечує послідовність фізичних процесів у відповідності зі збереженням енергії та імпульсу, що призводить до спостереженого зміщення частоти, і не використовує геометричний опис. Гравітаційне поле впливає на вивільнення фотона, а не на атомний міжрівневий перехід. Єдиним «контрольним» параметром є швидкість світла. Випромінювання атома тоді контрастує з гравітаційним червоним зміщенням аннігіляційних подій матеріяантиматерія» [60].

У 1980—1981 рр. із точністю 1 % було перевірено ефект ГЧЗ, викликаний гравітаційним полем Сатурна, за допомогою стабільних атомних годинників, встановлених 1977 р. на КА «Воялжер» (див. також [58, 59]). Нагадаємо, що американські КА «Вояджер-1, 2» були запущені у 1977 р. для досліджень зовнішніх планет Сонячної системи. У 1980-х роках траєкторії КА після обльотів планет-гігантів було скеровано так, щоб вони у різних напрямах залишили Сонячну систему («Вояджер-2» летить у південній півсфері під кутом 48° до екліптики, «Вояджер-1» — під кутом 38° над екліптикою). Вважають, що потужності трьох радіоізотопних термоелектричних генераторів, паливом для яких слугує <sup>238</sup>Pu, вистачить до 2025 р., при цьому швидкість руху станцій становить близько 3.3 астрономічних одиниць у рік. У грудні 2011 р. КА «Вояджер-1» подолав зону геліопаузи Сонячної системи і став першим штучним об'єктом Землі, який вийшов у міжзоряний простір (за його рухом можна слідкувати у режимі реального часу на сайті NASA).
# ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ПОЛІ КОМПАКТНИХ ЗІР

Дослідження таких небесних тіл, як білі карлики, нейтронні зорі, квазари, галактики з активними ядрами ведуться з урахуванням ЗТВ, оскільки компактні зорі на останніх стадіях своєї еволюції є релятивістськими об'єктами, а активність ядра галактики добре пояснюється акрецією речовини на центральну масивну (надмасивну) чорну діру. Для таких об'єктів ЗТВ не є теорією, що потребує підтвердження, а є теорією, що дозволяє здійснити критичні тести для перевірки астрофізичних моделей. Стосовно ефекту ГЧЗ варто відзначити, що на поверхні деяких компактних об'єктів його величина може бути порівняною з допплерівською шириною лінії (див. таблицю). Вимірювання ГЧЗ надає можливість отримати дані про радіус цих небесних тіл, при цьому зорі з великим відношенням «масарадіус» мають і більше значення ГЧЗ.

На поверхні білих карликів ГЧЗ сягає  $z_g \approx 10^{-4}$ і переважає над допплерівською шириною лінії. Якщо білий карлик входить до подвійної системи, з надійною точністю можна оцінити його масу *M*. Тоді у формулі (8) залишається один вільний параметр — радіус *R* білого карлика, який визначають з цієї формули за результатами вимірювання  $z_g$  та *M*. Як і у формулі (3), можемо записати, що спектральна лінія, випромінювана атомом, що перебуває на певній відстані г від поверхні зорі, має гравітаційне червоне зміщення

$$z_g \approx \frac{GM_*}{rc^2} \,. \tag{9}$$

На відміну від Сонця, ефект ГЧЗ є суттєвим для білих карликів [55]: вперше він був виміряний Поппером у 1954 р. для білого карлика 40 Eridani, а саме  $z_{g\,6\kappa} = (7\pm1) \cdot 10^{-5}$  (див. таблицю). Найбільш цікавим з цього класу небесних тіл

Найбільш цікавим з цього класу небесних тіл довгі роки залишався компаньйон найближчої до Сонця зорі Сиріус (відстань становить 8.6 св. років), яка, як відомо, є подвійною зорею. Хоча Сиріус В (білий карлик) був відкритий А. Кларком ще у 1862 р., проблема його спостережень полягала в тому, що випромінювання від цього компонента маскувалося випромінюванням головної зорі системи, Сиріусом А. І лише у 2005 р. Барстоу та ін. [21], використовуючи можливості спектрографа STIS Космічного телескопа Габбла щодо розділення обох компонентів Сиріуса і дату найближчого зближення з Землею у 1993 р., коли ця роздільна здатність була найвищою, вдалося обробити дані повної серії бальмерівських ліній Сиріуса В. Вони отримали як значення ефекту ГЧЗ  $z_g = 80.42 \pm 4.83$  км/с, так і точні дані про масу і радіус:  $m_{\text{SiriusB}} = (1.02 \pm 0.02) M_{\odot}$ ,  $R_{\text{SiriusB}} = 0.0081 \pm 0.0002 R_{\odot}$ . Для визначення радіуса і маси (до цього часу масу Сиріуса В визначали за гравітаційною взаємодією з Сиріусом А) було використано фотометричні дані та паралакси, отримані КА HIPPARCOS. Виявилось, що при масі у 98 % маси Сонця і діаметрі 12 км сила гравітації на його поверхні у 350 тис. разів більша за земну (нагадаємо, що чим більша маса білого карлика, тим менший його діаметр), при цьому головний компаньйон системи, Сиріус А, має масу 2*M*<sub>•</sub>, діаметр — близько 2.4 млн км, поверхневу температуру — 10 500 К.

У 2013 р. Ренсом та ін. [48] повідомили про багатохвильові спостереження відкритого ними унікального мілісекундного пульсара PSR J0337+1715 (пульсація осі цієї нейтронної зорі становить 365.953363096 с<sup>-1</sup>), який знаходиться у напрямі сузір'я Тільця на відстані 4200 св. років. Унікальність його полягає ще й у тому, що цей пульсар компаньйонами має дві компактні зорі — близький і зовнішній білі карлики. Тобто, всі компоненти потрійної системи є сильними самогравітуючими тілами, які показують ще й сильну гравітаційну взаємодію в системі: гравітаційне поле зовнішнього білого карлика суттєво прискорює внутрішню подвійну систему «нейтронна зоря + близький білий карлик». Це дозволило точно встановити їхні маси —  $(1.4378 \pm 0.0013) M_{\odot}$  для радіопульсара та  $(0.19751 \pm 0.00015) M_{\odot}$  і  $(0.4101 \pm 0.0003) M_{\odot}$  для внутрішнього і зовнішнього білих карликів. Виявлені дуже компланарні та майже колові орбіти (нахил орбіт 39.2°) обох білих карликів свідчать про стійку спільну еволюцію потрійної системи у минулому. Спостереження показали, що внутрішній білий карлик обертається навколо пульсара ближче, ніж Меркурій навколо Сонця, з періодом 1.63 доби. Зовнішній білий карлик обертається з періодом

Зоря	Тип	M/M <sub>☉</sub>	<i>R</i> , км	Зміщення Δλ за рахунок ефекту ГЧЗ, %	Зміщення Δλ за рахунок ефекту Допплера, %
Rigel A	Блакитно-білий надгігант	20.9	$5.5 \cdot 10^{7}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	-0.0059
Epsilon Eridani	Коричневий карлик	0.76	$5.1 \cdot 10^{5}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0134
61 Cygni A	К-карлик	0.69	$4.6 \cdot 10^{5}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0214
Wolf 359	N/A	0.089	$1.1 \cdot 10^{5}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	-0.0063
Proxima Centauri	Червоний карлик	0.123	$9.8\cdot 10^4$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0072
DX Cancri	Червоний карлик	0.089	$7.7 \cdot 10^4$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	-0.0030
Ross 128	Червоний карлик	0.149	$1.5 \cdot 10^{5}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0103
Barnard's Star	Червоний карлик M4Ve	0.143	$1.4 \cdot 10^{5}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0369
UY Scuti	Червоний надгігант	7.9	$1.2 \cdot 10^{9}$	$9.9 \cdot 10^{-7}$	N/A
Altair	Тип А гол послід	17.75	$1.3 \cdot 10^{6}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0087
Procyon A	Жовтий гол послід	1.41	$1.4 \cdot 10^{6}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	0.0010
Zeta Ophiuchi	Жовтий надгігант	19.9	$5.9 \cdot 10^6$	$0.4 \cdot 10^{-4}$	0.0050
Alpha Centauri A	Жовтий карлик G2V	1.09	$8.5 \cdot 10^{5}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0072
Сонце	Жовтий карлик G2V	1	$6.9 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	N/A
Procyon B	Білий карлик	0.59856	$8.6 \cdot 10^{3}$	0.010	0.0011
Sirius B	» »	0.9724	$5.9 \cdot 10^3$	0.025	0.0025
IK Pegasi B	» »	1.15	$4.2 \cdot 10^{3}$	0.041	0.0038
Van Maanen 2	» »	0.68	$7.7 \cdot 10^{3}$	0.013	0.0127
40 Eridani B	» »	0.497	$9.8 \cdot 10^{3}$	0.008	0.0143

Ефект гравітаційного червоного зміщення та ефект Допплера для білих карликів у порівнянні з відомими зорями різних типів (узагальнений варіант таблиці див. у роботі [45])

327.257541 діб по орбіті, яка віддалена від пульсара приблизно як орбіта Землі від Сонця. Автори роботи [48] вважають, що саме відкрита ними система PSR J0337 + 1715 надасть можливість встановити порушення сильного принципу еквівалентності та межі застосування ЗТВ, — моніторинг пульсацій нейтронної зорі буде тривати щонайменше рік (час обертання зовнішнього білого карлика, у сильному гравітаційному полі якого опинився пульсар).

Кількість білих карликів у Галактиці складає приблизно 10 % від кількості загального зоряного населення. Але їхня роль у загальній еволюції матерії у Всесвіті, як і у встановленні наших знань про його еволюцію, набагато більша. Багату інформацію про білі карлики надала космічна обсерваторія «Кеплер», зокрема серед них були виділені ті, для яких можна дослідити їхні коливання. Так зване «астросейсмологічне» дослідження об'єкта КІС08626021 (Ј192904.6+444708), який перебуває на відстані 1375 св. років, дозволило за характером його коливань встановити масу його гомогенного ядра у 0.45  $M_{\odot}$ , а 86 % його маси становить кисень, що виходить за межі сучасних положень теорії зоряної еволюції (ці величини на 40 % і 15 % відповідно є більшими), або може бути прикладом існування аномальних білих карликів. Нагадаємо, що компактні білі карлики, внаслідок акреції речовини на них від гігантських компаньйонів у подвійних зоряних системах, із часом вибухають як наднові зорі типу Іа. Вимірювання відстаней до цих наднових у 1998 р., разом із даними про мікрохвильове реліктове випромінювання, засвідчили нову космологічну парадигму про прискорене розширення Всесвіту.

Особливо важливим є вимірювання ефекту поверхневого ГЧЗ для нейтронних зір, оскільки радіус нейтронної зорі важко піддається оцінюванню, насамперед у випадку радіопульсарів. Нагадаємо, що Вейнберг у 1972 р. показав, що для будь-якої нейтронної зорі, що описується рівняннями Толмена — Оппенгеймера — Волкова, повинна задовольнятися умова стабільності и, портина одержити  $r_g/R_{\rm H3} < 8/9$ , тобто  $z_g < 2$ . Звідси виходить, що для нейтронної зорі, що не обертається,  $z_g = 0.13$ , а для нейтронної зорі, що обертається,  $z_{g}$  = = 0.184...0.854. Надійніше ефект ГЧЗ вимірюється для пульсарів, — унікальних об'єктів, відкритих на початку 1970-х років за допомогою космічної обсерваторії UHURU. Пізніші дослідження показали, що деякі пульсари мають емісійні лінії в діапазоні від 10 до 40 кеВ, які можуть бути гравітаційно зміщеними циклотронними лініями в сильних магнітних полях (наприклад, для поля з напруженістю  $B = 10^{12}$  Гс базова циклотронна частота становить 11.6(1 + z), і для пульсара Her X-1 для емісійної лінії на 40 кеВ вона може бути інтерпретована як вища гармоніка циклотронної частоти). Важливо додати, що ефект ГЧЗ модифікує спостережуваний спектр поверхні нейтронної зорі, а саме, він зменшує поверхневу температуру на фактор (1+z). Детальніше з цим питанням можна ознайомитися у монографії [35].

Перший надійний результат із ототожнення спектральних ліній нейтронної зорі було отримано за допомогою космічного телескопа «ХММ-Ньютон» у спостереженнях 2000 р. за рентгенівським джерелом EXO0748-676 [25, 49]. У спектрі цієї нейтронної зорі вдалося ідентифікувати лінії обідраних атомів Fe XXVI та FeXXV (з переходами n = 2-3), OVII та OVIII (з переходами n = 1-2). Довжини хвиль цих ліній зміщено у червону частину спектру однаково на величину  $z_g = 0.35$ . Із формули (8) отримуємо, що радіус нейтронної зорі становить  $R_{\rm H3} \approx 2.2 r_g$ , а  $R_{\rm H3} \cdot M_{\odot}/M_{\rm H3} R_{\odot} \approx 6.6 км$  (нагадаємо, що  $M_{\odot} = (1.98892 \pm 0.00025) \cdot 10^{30}$  кг). Якщо припустити, що маса зорі є стандартною для більшості пульсарів ( $1.4M_{\odot}$ ), то тоді отриманий результат відповідає моделі звичайної нейтронної зорі без урахування фазових переходів у піон-каонний конденсат або кварк-глюонну плазму. Якщо маса нейтронної зорі  $M_{\rm H3} < 1.1M_{\odot}$ , то отримане значення радіуса виявляється досить малим, і рівняння стану нейтронної зорі потребує уточнень. Для порівняння зазначимо, що маса і радіус найвідомішого пульсара PSR B0531+21 у Крабовидній туманності становить 1.14 $M_{\odot}$  і 9.945 км відповідно [45].

Зокрема, у роботах [65, 66] подано результати розрахунків поверхневого ГЧЗ для масивних нейтронних (гіперонних) зір PSR J0348+0432 ( $z_a =$ = 0.35...0.40) TA PSR J1614-2230 ( $z_g = 0.41...0.54$ ), отримані в рамках релятивістської теорії в наближенні середнього поля, яке найчастіше застосовується для опису процесів у нейтронній зорі. Якщо ж застосовувати складову кваркову модель (симетрія SU(6)), то для PSR J1614-2230 поверхневе значення ГЧЗ буде становити  $z_{\sigma} = 0.25$ . Нагадаємо, що пульсар PSR J0348 + 0432, радіус якого становить  $R_{\rm H3} \approx 12.062...12.957$  км, був відкритий у 2007 р., а величину його маси  $M_{\rm H3} = (2.01 \pm 0.04) M_{\odot}$  було виміряно у 2013 р. [14] завдяки тому, що він є подвійною системою (супутник — білий карлик, співвідношення мас у системі 1:11.7). Оскільки він має дуже короткий орбітальний період у 2 год 27 хв, це дозволило виміряти його орбітальну затримку, викликану випромінюванням гравітаційних хвиль. Пульсар PSR J0348 + 0432 є одним із наймасивніших відомих пульсарів, а його маса трохи вища за масу пульсара PSR J1614-2230 (теж подвійна система: нейтронна зоря і білий карлик), яка була виміряна за допомогою ефекту Шапіро  $(M_{\rm H3} = (1.97 \pm 0.04) M_{\odot})$  у 2010 р. [28]. Маси цих обох пульсарів окреслюють нижню емпіричну межу Толмана — Оппенгеймера — Волкова для умови стабільності нейтронної зорі.

Найголовнішим співвідношенням для нейтронних і гіперонних зір залишається співвідношення «радіус-маса» зорі, яке надає необхідну інформацію на обмеження рівняння стану надщільного стану речовини зорі. Саме тому гравітаційне червоне зміщення на поверхні нейтронної

зорі, що відповідає співвідношенню «радіус-маса» нейтронної зорі, є головним спостережуваним методом дослідження, яке досить нелегко здійснити. Допомогти в цьому можуть спостереження термоядерних рентгенівських всплесків на поверхні цих зір. Як приклад, приведемо дані з роботи [40], де було проанілізовано термоядерний рентгенівський вибух із маломасивної рентгенівської подвійної системи GRS 1747-312. Використовуючи архівні дані КА «Сузаку», автори цієї статті дослідили рентгенівський вибух, який був послідовно виявлений під час моніторингових спостережень балджа Галактики і тривав достатньо часу із помірним фотосферичним радіусом від цієї системи. За оцінками цих авторів, поверхневе значення ГЧЗ становило  $z_{\sigma} = 1.56 \pm 0.03$ , при цьому, щоб відокремити цей ефект від допплерівського зсуву спектральних ліній, потрібно припустити, що водневоподібні лінії іонів заліза і цинку відповідають за крила спектральних ліній. Отримане значення відповідає радіусу та масі цієї системи  $R_{{}_{\mathrm{H3}}} \approx 7...10$  км та  $M_{{}_{\mathrm{H3}}} \approx 1.4...2 M_{\odot}$ .

При цьому відмітимо, що якщо до класичного розгляду ГЧЗ для нейтронної зорі підключити нелінійну електродинаміку, це призводить до модифікації базисної основи ГЧЗ, насамперед для надсильно намагнічених компактних об'єктів, таких як пульсари. Такі теорії використовують точний нелінійний лагранжіан Борна — Інфельда. А саме, на відміну від ЗТВ, де ГЧЗ не залежить від будь-якого фонового магнітного поля (В-поля), якщо ввести нелінійну електродинаміку для фотонів, то виявляється, що ефект ГЧЗ залежить від фонового магнітного поля, що діє на пульсар. Зокрема, Квеста і Салім [26] показали, що ефект ГЧЗ може прямувати до нескінченності зі зростанням В-поля. Така ситуація може вводити в оману при розрахунках співвідношення «радіус-маса» нейтронної зорі і, у свою чергу, рівняння стану речовини компактної зорі, а отже, вимагає акуратного розділення ефектів нелінійної електродинаміки і ефекту ГЧЗ у випадках ультрамагнітних пульсарів.

Додамо також, що компактні об'єкти — зорі на останніх стадіях еволюції, такі як білі карлики або нейтронні зорі, — є ідеальними об'єктами для перевірки *сильного принципу еквівалентності*<sup>4</sup> (такі перевірки у Сонячній системі практично унеможливлюються відсутністю в ній сильних самогравітуючих тіл). Пульсари (нейтронні зорі) характеризуються високоточним періодом обертання, і у випадку, коли вони є компонентами подвійних зоряних систем, як це згадувалось, надають унікальні можливості для перевірки ЗТВ у сильних гравітаційних полях та непрямі підтвердження існування гравітаційних хвиль. Найбільш вивченими є пульсар PSR1913 + 16 — член подвійної системи (дві нейтронні зорі з приблизно однаковими масами  $M_{\rm H3} \approx 1.4 M_{\odot}$ ), відкритий Халсом і Тейлором в 1975 р. [34] та досліджений у багатьох працях (див. зокрема [27]), а також подвійний радіопульсар PSR J0737-3039 А+В, відкритий Бурже та ін. у 2003 р. [23]. Про важливість останньої подвійної системи для перевірок ЗТВ вперше було відзначено в роботі [39]. Це єдина на даний момент система, що містить два пульсари (їхні маси становлять  $1.337 M_{\odot}$  і  $1.250 M_{\odot}$ ): вона має найменший орбітальний період 2.45 години з відомих подібних систем, де спостерігаються найсильніші релятивістські ефекти (див. також [37, 47]). Найточнішими для перевірки сильного принципу еквівалентності могли би стати компактні зорі у потрійних системах, до яких можна застосувати класичну задачу трьох тіл, але вони є досить екстраординарними поки що для спостережень. Донедавна була відома лище одна така система, відкрита у 1999 р. Сорсеттом та ін. [53] — мілісекундний пульсар PSR B1620-26, компаньйонами якого є білий карлик та екзопланета юпітеріанської маси. Роки спостережень поки що не дали очіку-

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Сильний принцип еквівалентності — у кожній точці простору-часу в довільному гравітаційному полі можна вибрати «локально-інерційну систему координат» таку, що в досить малому околі даної точки закони природи будуть мати таку ж форму, як і в неприскорених декартових системах координат, де під «законами природи» мають на увазі всі закони природи [1]. Різниця між сильним і слабким принципами еквівалентності в тому, що слабкий принцип — це локальне твердження, а сильний принцип — це твердження, що стосується будь-якої точки простору часу, тобто будь-якого місця у Всесвіті та будь-якого часу в минулому чи майбутньому.

ваних результатів, оскільки виявилося, що ця потрійна система є слабко взаємодіючою [52].

Нагадаємо, що на сьогодні відомо близько двох тисяч пульсарів, 10 % яких є мілісекундними.

У 2017 р. спеціалісти НАСА провели перші випробування нової рентгенівської системи автономної навігації NICER (Neutron-star Interior Composition Explorer) та спорідненого експерименту SEXTENT (Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology) на Міжнародній космічній станції. Система NICER, яка в майбутньому може бути використана як «космічна GPS», містить у собі дві незалежні підсистеми, які реєструють сигнали віддалених пульсарів у рентгенівському діапазоні. З одного боку, ці пульсари слугують опорними об'єктами, що надають можливість точного визначення положення МКС на орбіті (тобто пульсари використовуються як атомні годинники). Сигнали від цієї системи приймаються антенами мережі далекого зв'язку NASA Deep Space Network (DSN) та European Space Tracking (ESTRACK), що дозволяє розрахувати траєкторію і швидкість польоту МКС. А саме, система NICER містить 52 невеликих рентгенівських телескопів та кремнієві датники, які відслідковують дрейф нейтронних зір і пульсарів; інструмент SEXTENT приймає видиме світло від цих об'єктів та виконує процедуру триангуляції; все разом дозволяє точно визначити точку орбіти МКС та порівняти її координати з даними від супутників системи GPS. З другого боку, випробування показали високу ефективність використання сигналів мілісекундних пульсарів для точного визначення місцеположення космічних апаратів, що рухаються зі швидкістю до 1000 км/с, не лише в Сонячній системі, а і в Галактиці. На першому етапі випробувань точність оцінки місцеположення МКС на орбіті становила 10 км (що краще, ніж точність оцінки за допомогою мережі антен далекого зв'язку), на другому етапі точність рентгенівської GPS буде покращено до 5 км.

Отже, перевірки ГЧЗ для нейтронних зір дозволяють отримати не тільки динамічні параметри зорі, а й уточнювати теоретичні моделі, якими описується фізичний стан зорі. Саме існування масивних пульсарів дало поштовх розвитку нової фізики екзотичних видів ядерної речовини, таких як гіперонні і каонні конденсати. Обертання таких найщільніших об'єктів довкола своєї осі з неймовірною швидкістю у декілька сотень обертів на секунду призводить, у разі відхилення форми нейтронної зорі від сферичної всього на декілька сантиметрів, до створення власних гравітаційних хвиль. Зіткнення та злиття нейтронних зір спричиняє короткий імпульс енергії, який за потужністю переважає потужність усіх зір у Галактиці. Цього достатньо, щоб змусити сам простір коливатись та поширювати гравітаційні хвилі.

Така подія — безпосередня реєстрація гравітаційних хвиль від джерела злиття нейтронних зір, що отримала назву «гравітаційна хвиля GW170817», стала можливою після об'єднання потужностей двох гравітаційних детекторів, американського LIGO та європейського VIRGO. Реєстрація відбулася 17 серпня 2017 р., а офіційне повідомлення з пілтверлженням вийшло 16 жовтня 2017 р.: спостереженнями на наземних і космічних обсерваторіях займалися 70 груп вчених, а співавторами однієї зі статей, присвячених цій події, стали понад 3.6 тис. учених [11]. Спалах гаммавипромінювання від джерела у напрямі сузір'я Гідра тривав дві секунди і був зареєстрований космічним телескопом «Фермі» і, трохи пізніше, космічною обсерваторією INTEGRAL [69], а післясвітіння у всіх спектральних діапазонах тривало декілька тижнів. Це дозволило через дев'ять днів отримати зображення джерела в рентгенівському діапазоні, а через 25 днів — у радіодіапазоні. Спалах був настільки потужним, що потрапив в зону чутливості гравітаційних детекторів LIGO/Virgo і тривав одну хвилину, — все разом дало можливість довести, що гамма-спалах відбувся від злиття нейтронних зір масою від 1.1 до 1.6 М<sub>о</sub>, які перебували на відстані 130 млн св. років від Землі, у галактиці NGC 4993. Такі гамма-спалахи називаються короткими гаммасплесками, а гамма-телескопи реєструють їх приблизно раз на тиждень. Якщо природа довгих гамма-сплесків зрозуміліша (їхні джерела спалахи наднових), то єдиної думки щодо джерел коротких сплесків немає, — вважалося, що їх породжують злиття нейтронних зір. Оскільки завдяки реєстрації гравітаційних хвиль детекторами LIGO/Virgo було отримано масу компонентів, то гіпотеза щодо природи коротких гаммаспалахів знайшла своє перше підтвердження (див. [11, 36, 69] тавеб-сайтhttp://www.sciencemag. org/news/2017/10/merging-neutron-starsgenerate-gravitational-waves-and-celestial-lightshow).

## ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ ДЛЯ ГАЛАКТИК І СКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК

Перевірка ефекту ГЧЗ на галактичних відстанях має свої труднощі не тільки тому, що потрібно виділяти космологічне червоне зміщення. Відкриття прискореного розширення Всесвіту (Нобелівська премія з фізики 2011 р.) вступає у протиріччя з багатьма спостережуваними даними, які потребують пояснення. Зокрема з тими, які свідчать, що це розширення має бути сповільненим. Є два найпоширеніші підходи пояснення невідповідностей спостереженням. Перший пов'язаний із припущенням існування невідомої субстанції з від'ємним тиском — темної енергії, яка домінує в енергетичному балансі Всесвіту, прискорюючи його розширення. Другий підхід пов'язаний з тим, що ЗТВ не спрацьовує на космологічних масштабах і не може пояснити гравітаційні зміни простору-часу, які могли б призвести до уповільнення розширення Всесвіту. Одним із методів підтвердження висновків ЗТВ на таких масштабах є вимірювання ефекту ГЧЗ для галактик і скупчень галактик.

Загальна теорія відносності передбачає, що при розгляді, наприклад, пари галактик більш масивна галактика буде деформувати простірчас у більшій мірі, ніж менш масивна галактика. У результаті світло, що випромінює масивніша галактика, буде більш червоним (з довшою довжиною хвилі). Нещодавно, у 2017 р., в серії робіт Алама та ін. [12, 67] опубліковано результати обробки даних півмільйона галактик вибірок СMASS і SDSS/BOSS зі Слоунівського цифрового огляду неба (SDSS) та показано, що масивніші галактики мають у середньому більше значення ГЧЗ, ніж менш масивні. При цьому для отримання гравітаційного червоного зміщення галактик за їхніми спектрами використовувалися фотометричні дані про видимі величини і колір, на величину яких впливають пекулярні швидкості галактик (у т. ч. ефект Допплера та релятивістські наближення).

У серії робіт нами було виконано мультихвильовий аналіз параметрів ізольованих галактик з активними ядрами (АЯГ) на червоних зміщеннях *z* < 0.1 [46], у т. ч. спектральний та часовий аналіз рентгенівських даних для 13 ізольованих АЯГ із цієї вибірки у широкому діапазоні енергій від 0.5 до 500 кеВ [57] за даними «Chandra», «Suzaku», «XMM-Newton», «Swift», «INTEGRAL», «NuStar». У залежності від якості спектрів, для них були отримані значення таких величин як «внутрішня» (виправлена за поглинання) світність у діапазоні 0.5...2.0 кеВ та 2...10 кеВ у одиницях 10<sup>33</sup> Дж/с, значення степеневого індексу Г, величини нейтрального поглинання (стовпчикова густина N<sub>H</sub>) в одиницях 10<sup>20</sup> см<sup>-2</sup>, енергії експоненційного обрізання E<sub>cut</sub> та параметра відбиття R, проведено оцінку мас центральної чорної діри. Така вибірка ізольованих АЯГ може слугувати тестовою вибіркою для галактик Місцевого Всесвіту, оскільки ці галактики не мали впливу навколишніх галактик упродовж останніх 3 млрд років. Отримано, що основні спектральні характеристики активного ядра ізольованих галактик у діапазоні 0.5...12 кеВ не відрізняються від таких характеристик галактик у щільнішому оточенні, а отже, доведено, що активність ядра галактик зумовлена здебільшого внутрішними фізичними процесами. Зокрема, за порівнянням спостережуваного прояву різних сценаріїв темпів акреції на центральну надмасивну чорну діру вперше виявлено, що окремі представники ізольованих галактик демонструють субедінгтонівську акрецію з характерним надлишком у м'якому рентгенівському діапазоні. Зважаючи на високу якість рентгенівських спектрів, можливість доповнення цих даних даними із інших діапазонів електромагнітного спектру (УФ, видимий), точні визначення червоного зміщення, ізольовані АЯГ можуть бути використані для оцінки ефекту ГЧЗ у близьких галактиках у рентгенівському діапазоні (надійнішими у такій постановці задачі будуть об'єкти типу Sy1 з вузькими лініями).

Варто відзначити нещодавню роботу, виконану у 2011 р. під керівництвом Р. Войтака для досліджень скупчень галактик, відібраних із огляду SDSS [64]. Ефект ГЧЗ у цьому випадку полягає в тому, що фотони, які надходять із центра масивного скупчення галактик, повинні зміщуватися сильніше в червону частину спектру, ніж фотони, які надходять із зовнішніх областей скупчення. Але для типового скупчення ефект ГЧЗ значно менший (на два порядки), ніж кінематичний ефект за рахунок руху галактик у скупченні. Ідея методу, що дозволяє розділити гравітаційний та кінематичний ефекти, враховує, що останній призводить до симетричного розширення спостережуваного розподілу швидкостей, тоді як ГЧЗ зсуває центральну частину цього розподілу. Зважаючи на порядок величини ГЧЗ, цілком ясно, що для впевненого вимірювання необхідно мати дуже велику кількість галактик зі спектроскопічно виміряними швидкостями, які пов'язані з ірегулярностями структури скупчень. Шоб вирішити цю задачу, було проведене усереднення даних для близько 8000 скупчень галактик та показано, що зміщення до червоного кінця спектру узгоджується з передбаченнями ЗТВ на 99 % рівні статистичної достовірності. Вперше ефект ГЧЗ було підтверджено астрономічними спостереженнями на масштабах, у 10<sup>22</sup> разів більших, ніж у лабораторних наземних експериментах. У роботі [64] зазначено, що цей результат може бути пояснений у рамках 3TB і не відповідає деяким альтернативним космологічним моделям без темної матерії.

Чи можлива перевірка ефекту ГЧЗ для рентгенівських скупчень галактик, статистична вибірка яких зростає з появою нових спостережуваних даних, отриманих діючими космічними обсерваторіями? Перевірка ефекту ГЧЗ для рентгенівських скупчень галактик є більш складним завданням, оскільки потребує детальної обробки центральної частини рентгенівського спектру скупчення галактик, а саме виділення найяскравішої галактики скупчення. Зважаючи на те, що такі методи обробки вже впроваджуються [33], постає необхідність створення програмного забезпечення, яке б надавало детальнішу картографію різних за енергетичними показниками зон центральної

частини скупчення галактик з метою виявлення типових спектральних особливостей. Надійнішими тут будуть дані рентгенівської космічної обсерваторії «Сузаку», інструменти якої можуть спостерігати розподіл міжгалактичного газу в складі скупчень уздовж усього віріального радіуса. У наших роботах [19, 20] досліджувалася еволюція світності  $L_x$ , температури газу  $T_g$  і маси газу  $M_g$  для понад 20 рентгенівських скупчень галактик на червоних зміщеннях z < 1.4, що спостерігалися космічними обсерваторіями «Чандра» і «ХММ-Ньютон». У припущенні гідростатичної рівноваги міжгалактичного газу і сферичної симетрії скупчення було показано, що еволюція  $M_g - T_g \epsilon$  незначною, в той час як світність і маса  $M_g - L_x$ еволюціонують стрімко з червоним зміщенням. Для близько 130 скупчень галактик, що спостерігалися КА «Чандра», було отримано спостережні профілі густини матерії і температури газу, визначено профілі повної маси (у т. ч. баріонної і темної матерії), а також профілі розподілу газу вздовж віріального радіуса [17, 18, 56] з урахуванням впливу найяскравішої галактики скупчень. Статистична вибірка наявних даних щодо рентгенівських скупчень галактик ще не є достатньою для перевірки ефекту ГЧЗ, хоча відповідне програмне забезпечення і його апробація вже виконані. Варто відзначити, завдяки ефекту ГЧЗ рентгенівське випромінювання, зокрема скупчень галактик, може мати зсув, який буде спостерігатися у видимому діапазоні. У випадку рентгенівського випромінювання (довжина хвилі нижча за 1 нм) є просте правило: коротша довжина хвилі означає більшу пропускну здатність, а пропускна здатність в цьому діапазоні довжин хвиль залежить лише від атомного числа хімічних елементів (що вище атомне число, то менша пропускна здатність). Це правило можна використовувати для ототожнення спектральних ліній в рентгенівському діапазоні, які завдяки ефекту ГЧЗ змістилися в оптичний діапазон електромагнітного спектру. Наочну візуалізацію ефекту ГЧЗ в рентгенівському діапазоні запропоновано в роботі [50].

# висновки

У роботі представлено короткий огляд досліджень з перевірок ефекту гравітаційного червоного зміщення. Зокрема, експерименти перевірок ефекту ГЧЗ у гравітаційному полі Землі, Сонця і великих планет Сонячної системи, компактних зір і скупчень галактик показують, що він справедливий з високою точністю. Описані експерименти достовірно свідчать про справедливість висновків Загальної теорії відносності Альберта Ейнштейна, даючи підстави стверджувати, що межі її застосування слід шукати на рівні фізики елементарних частинок.

Основні результати цієї статті були представлені автором на міжнародній конференції EWASS-2017, Спеціальній сесії «*Relativity at 100: Past, Present, and Future of observational and theoretical puzzles»* (Прага, Чеська Республіка, 2017 р.), під час якої була презентована монографія «Общая теория относительности: признание временем» [1], написана українськими авторами до 100-річчя Загальної теорії відносності.

Автор висловлює подяку академіку НАН України Я. С. Яцківу і члену-кореспонденту НАН України В. П. Гусиніну за корисні зауваження до статті, яка підготовлена в рамках виконання Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (2012—2017).

# ЛІТЕРАТУРА

- Александров А. Н., Вавилова И. Б., Жданов В. И., Жук А. И., Кудря Ю. Н., Парновский С. Л., Федорова Е. В., Яцкив Я. С. Общая теория относительности: признание временем. — К.: Наук. думка, 2015. — 332 с.
- 2. *Брагинский В. Б., Денисов В. И.* (ред.). Экспериментальные тесты теории гравитации. М.: МГУ, 1989. 254 с.
- Коркина М. П., Григорьев С. Б. Эксперименты ОТО в Солнечной системе // Вісник астрон. шк.. – 2000. – 1, № 2. – С. 29–37.
- Корсунь А. О. Вимір часу від давніх-давен до сучасності. — К.: Техніка, 2009. — 176 с.
- 5. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977.
- Уилл К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
- Эйнштейн А. О специальной и общей теории относительности / Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — С. 530—600.
- Яцків Я. С., Александров О. М., Вавилова І. Б., Жданов В. І., Кудря Ю. М., Парновський С. Л., Федорова О.В.,

*Хміль С.В.* Загальна теорія відносності: випробування часом. — К.: ГАО НАН України, 2005. — 288 с.

- Яцків Я. С., Александров О. М., Вавилова І. Б., Жданов В. І., Жук О.І., Кудря Ю. М., Парновський С. Л. Федорова О. В., Хміль С. В. Загальна теорія відносності: горизонти випробувань. — К.: ГАО НАН України, 2013. — 264 с.
- Яцків Я. С., Корсунь А. О., Хода О. О. Базове координатно-часове забезпечення розвитку в Україні топографо-геодезичної діяльності, землевпорядкування та навігації рухомих об'єктів // Інноваційні технології. 2003. № 4–5. С. 4—21.
- AAbbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral // Phys. Rev. Letters. - 2017. - 119. -P. 161101.
- Alam Shadab, Croft Rupert A. C., Ho Shirley, Zhu Hongyu, Giusarma Elena. Relativistic Effects on Galaxy Redshift Samples due to Target Selection (2017) arXiv:1709.07856
- Alley C. O., Cutler L. S., Reisse R., et al. Experimental Gravitation // Proc. of the conf. at Pavia (1976) / Ed. B. Bertotti. — Academic Press, 1977.
- Antoniadis J., Freire P. C. C., Wex N., et al. A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary // Science. 2013. 340 (6131): 1233232.
- Ashby N. Relativistic effects in the Global Positioning System // Dadhich N. and Narlikar J. V. eds., Gravitation and Relativity: At the Turn of the Millennium. 15th International Conference on General Relativity and Gravitation. — Inter-University Center for Astron. Astroph., Pune, India. — 1998. — P. 231—258.
- Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Rev. Relativ. — 2003. — 6, N 1. https://doi.org/10.12942/ lrr-2003-1
- Babyk Iu. V., Vavilova I. B. Comparison of Optical and Xray Mass Estimates of the Chandra Galaxy Clusters at z < 0.1 // Odessa Astron. Publ. – 2013. – 26. – P. 175–178.
- 18. Babyk Yu.V., Del Popolo A., Vavilova I. B. Chandra X-ray galaxy clusters at  $z \le 1.4$  // Astron. Reports. -2014. -**58**, N 9. P. 587–610.
- Babyk I., Vavilova I. The distant galaxy cluster XLSSJ022403.9-041328 on the LX-TX-M scaling relations using Chandra and XMM- Newton observations // Astrophys. and Space Sci. – 2014. – 353, N 2. – P. 613–619.
- Babyk I., Vavilova I. The Chandra X-ray galaxy clusters at z < 1.4: constraints on the evolution of LX-T Mg relations // Astrophys. and Space Sci. – 2014. – 349, N 1. – P. 415–421.
- Barstow M. A., Bond H. E., Holberg J. B., et al. Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer lines in Sirius B // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2005. – 362. – P. 1134–1142.
- Brault J. W. The gravitational redshift in the Solar spectrum: Doctoral dissertation. Princeton Univ., 1962. // Abstract: Bull. Amer. Phys. Soc. — 1963. — 8. — P. 28.

- 23. Burgay M., D'Amico N., Possenti A., Manchester R. N., et al. An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system // Nature. 2003. **426**. P. 531–533.
- Cacciapuoti L., Salomon Ch. Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment // Eur. Phys. J. – Special Topics. – 2009. – 172. – P. 57–68.
- 25. *Cottam J., Paerels F., Mendez M.* Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star // Nature. 2002. **420**. P. 51–54.
- Cuesta H. J. M., Salim J. M. Non-linear electrodynamics and the gravitational redshift of highly magnetized neutron stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2004. – 354. – P. L55–L59.
- Damour T., Taylor J. H. On the orbital period change of the binary pulsar RSR 1913+16 // Astrophys. J. – 1991. – 366. – P. 501–511.
- Demorest P. B., Pennucci T., Ransom S. M., Roberts M. S. E., Hessels J. W. T. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay // Nature. — 2004. — 467 (7319). — P. 1081—1083.
- *Einstein A*. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes // Ann. Phys. 1911. 35. P. 898–908.
- Godone A., Novero C., Tavella P. Null gravitational redshift experi¬ment with nonidentical atomic clocks // Phys. Rev. D. – 1995. – 51. – P. 319–323.
- Guinot B. Time scales in the context of general relativity // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 2011. 369, N 1953. P. 4131–4142.
- Hafele J. C., Keating R. E. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains // Science. – 1972. – 177, N 4044. – P. 166–168.
- 33. Hogan M. T., McNamara B. R., Pulido F. A., et al. The Onset of Thermally Unstable Cooling from the Hot Atmospheres of Giant Galaxies in Clusters: Constraints on Feedback Models // Astrophys. J. – 2017. – 851, N 1. – article id. 66. – 20 p.
- 34. Hulse R. A., Taylor J. H. Discovery of a pulsar in a binary system // Astrophys. J. Lett. – 1975. – 195. – P. L51–L53.
- Iyer B.R., Bhawal B. Black holes, gravitational radiation and the Universe. Essays in honor of C. V. Vishveshwara. — Springer-Science+Business Media, B.V., 1999.
- Kasliwal M. M., et al. Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger// Science (16 October 2017). — eprint arXiv:1710.05436.
- Kramer M., Stairs I. H., Manchester R. N., et al. Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar // Science. – 2006. – 314, N 5796. – P. 97–102.
- Laurent Ph., Massonnet D., Cacciapuoti L., Salomon Ch. The ACES/PHARAO space mission // C. R. Phys. – 2015. – 16, N 5. – P. 540–552.

- Lyne A. G., Burgay M., Kramer M., et al. A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics // Science. – 2004. – 303, N 5661. – P. 1153–1157.
- 40. Masachika I., Tadayasu D., Masanobu O., et al. Estimation of the surface gravitational redshift of a neutron star with the broad spectral feature detected during the thermonuclear X-ray Burst. Retrieved from: http://lambda. phys.tohoku.ac.jp/nstar/content/files/NSMAT2016/ Presentation/Iwai\_NSMAT2016.pdf.
- 41. *Meynadier F., Delva P., le Poncin-Lafitte C., et al.* Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) data analysis // arXiv 1709.06491v1 (2017)
- 42. *Overduin J.* Testing Einstein (2007, December). Retrieved from https://einstein.stanford.edu/SPACETIME/space-time3.html
- 43. *Pound R. V., Rebka G. A.* Apparent weight of photons // Phys. Rev. Lett. 1960. **4**, N 7. P. 337–341.
- Pound R. V., Snider J. L. Effect of Gravity on Nuclear Resonance // Phys. Rev. Lett. – 1964. – 13, N 18. – P. 539–540.
- 45. *Procyk R., Truong B.* Gravitational redshift. Retrieved from: http://www.physics.brocku.ca/Courses/1P22\_DA-gostino/samples/GravRed.pdf
- 46. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., et al. The 2MIG isolated AGNs – I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2015. – 447, N 3. – P. 2209–2223.
- Rafikov R. R., Lai D. Effects of Pulsar Rotation on Timing Measurements of the Double Pulsar System J0737-3039 // Astrophys. J. – 2006. – 641. – P. 438–446.
- Ransom S. M., Stairs I. H., Archibald A. M., et al. A millisecond pulsar in a stellar triple system // Nature. 2014. 505. — P. 520—524.
- Sanwal D., Pavlov G. G., Zavlin V. E., Teter M. A. Discovery of absorption features in spectrum of an isolated neutron star // Astrophys. J. 2002. 574. P. L61–L64.
- 50.Šimkovič S., Teleki A. Visualization of the X-ray by gravitational redshift. https://conferences.ukf.sk/index.php/ phdconf/phdconf2012/paper/download/977/287
- 51. *Shild A.* Gravitational theories of the Whitehead type and the Principle of Equivalence. // Evidence for Gravitational theories / Ed. Muller C. New York: Academic Press, 1962.
- 52. Sigurdsson S., Richer H. B., Hansen B. M., et al. A young white dwarf companion to pulsar B1620–26: evidence for early planet formation // Science. – 2003. – 301. – P. 193–196.
- 53. *Thorsett S. E., Arzoumanian Z., Camilo F., Lyne A. G.* The triple pulsar system PSR B1620–26 in M4 // Astrophys. J. 1999. **523**. P. 763–770.

- 54. Touboul P., Metris G., Rodrigues M., et al. MICROSCOPE mission: first results of a space test of the Equivalence Principle // Phys. Rev. Lett. – 2017. – 119. – article 231101.
- 55. Trimble V., Barstow M. (2010). Gravitational redshift and White Dwarf stars. Einstein Online, 04. Retrieved from http://www.einstein-online.info/spotlights/redshift\_ white\_dwarfs University of Illinois (November, 1995).
- Vavilova I. B., Bolotin Yu. L., Boyarsky A. M., et al. Dark matter: Observational manifestation and experimental searches. — Kiev: Akademperiodyka, 2015. — 375 p.
- Vavilova I. B., Vasylenko A. A., Babyk Iu. V., Pulatova N. G. X-Ray Spectral Properties of the Isolated AGNs: NGC 1050, NGC 2989, ESO 317-038, ESO 438-009 // Odessa Astron. Publ. – 2015. – 28. – P. 150–153.
- Vessot R. F. C., Levine M. V. A test of the equivalence principle using a space-born clock // Gen. Rel. Grav. 1979. 10. — P. 181.
- Vessot R. F. C., Levine M. V., Mattison E. M., et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser // Phys. Rev. Lett. – 1980. – 45. – P. 2081–2084.
- 60. *Wilhelm K., Dwivedi B. N.* On the Gravitational redshift // arxiv.org/abs/1708.06609.
- 61. *Will C. M.* Theory and experiment in gravitational physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.
- Will C. M. The confrontation between General Relativity and experiment // Astrophys. and Space Sci. – 2003. – 283, N 4. – P. 543–552.
- Will C. M. The confrontation between General Relativity and Experiment // General Relativity and John Archibald Wheeler / Eds I. Ciufolini, R. Matzner. — Springer, 2010. — P. 73–93.
- Wojtak R., Hansen S. H., Hjorth J. Gravitational redshift of galaxies in clusters as predicted by general relativity // Nature. – 2011. – 477. – P. 567–569.
- *Zhao Xian-Feng.* The surface gravitational redshift of the neutron star PSR J1614-2230 // Acta phys. pol. B. – 2013. – 44, N 2. – P. 213–219.
- 66. Zhao Xian-Feng, Jia Huan-Yu. The surface gravitational redshift of the massive neutron star PSR J0348+0432 // Rev. mex. astron. y astrofis. – 2014. – 50. – P. 103–108.
- *Zhu Hongyu, Alam Shadab, Croft Rupert A. C., et al.* N-body simulations of gravitational redshifts and other relativistic distortions of galaxy clustering //arXiv:1709.07859, 2017.
- Giammichele N., Charpinet S., Fontaine, et al. A large oxygen-dominated core from the seismic cartography of a pulsating white dwarf // Nature. Lett. — 07 November 2017. — doi:10.1038/nature25136.
- Savchenko V., Ferrigno C., Kuulkers E., et al. INTEGRAL detection of the first prompt gamma-ray signal coincident with the gravitational-wave event GW170817 // Astrophys. J. Lett. – 2017. – 848, N 2. – L15.

Стаття надійшла до редакції 18.01.18

# REFERENCES

- 1. Alexandrov A. N., Vavilova I. B., Zhdanov V. I., et al. General Relativity Theory: Recognition through Time. *Kiev, Naukova dumka*, 332 pp. (2015).
- 2. Braginsky V. B., Denisov V. I. (Eds.). Experimental tests of the theory of gravitation. Moscow, MSU, 254 P. (1989). (In Russian).
- 3. Korkina M. P., Grigorev S. B. GRT Experiments in the Solar System. *Astronomical School's reports*, 1(2): 29–37 (2000). (In Russian).
- 4. Korsun' A.O. Measurement of time from ancient times to the present. Kyiv: Tekhnika, 176 P. (2009). (In Ukrainian).
- 5. Misner Charles W., Thorne Kip S., Wheeler John A. Gravitation. San Francisco: W.H. Freeman and Co. (1973).
- Will Clifford M. Theory and Experiment in Gravitational Physics. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 396 P. (1993).
- Einstein A. Relativity: The Special and General Theory (1916). In: Methuen & Co Ltd, Authorised translation by Robert W. Lawson (1920).
- 8. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., et al. General Relativity theory: tests through time. *Kyiv, MAO NAS of Ukraine*, 288 p. (2005).
- 9. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., et al. General Relativity: horizons for tests. *Kyiv: MAO NAS of Ukraine*, 264 pp. (2013). (In Ukrainian).
- Yatskiv Ya. S., Korsun' A. O., Khoda O. O. Basic coordinate-time protection of development in Ukraine of topographic and geodetic activity, land-regulation and navigation of moving objects. *Innovation technologies*, 4-5: 4-21 (2003). (In Ukrainian).
- 11. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Letters*, **119**, 161101 (2017)..
- Alam Shadab, Croft Rupert A. C., Ho Shirley, Zhu Hongyu, Giusarma Elena. Relativistic Effects on Galaxy Redshift Samples due to Target Selection. *arXiv*:1709.07856 (2017)
- 13. Alley C.O., Cutler L.S., Reisse R., et al. Experimental Gravitation. *Proc. of the conf. at Pavia* (1976), ed. B. Bertotti, Academic Press, 1977.
- Antoniadis J., Freire P. C. C., Wex N., et al. A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary. Science, 340 (6131): 1233232 (2013).
- 15. Ashby N. Relativistic effects in the Global Positioning System. Dadhich N. and Narlikar J. V. eds., Gravitation and Relativity: At the Turn of the Millennium. *15th International Conference on General Relativity and Gravitation*. Inter-University Center for Astron. Astroph., Pune, India, P. 231–258 (1998).
- Ashby N. Relativity in the Global Positioning System. Living Rev. Relativ., 6: 1 (2003). https://doi.org/10.12942/ lrr-2003-1.

- Babyk Iu. V., Vavilova I. B. Comparison of Optical and X-ray Mass Estimates of the Chandra Galaxy Clusters at z < 0.1. *Odessa Astron. Publ.*, **26**: 175–178 (2013).
- Babyk Yu.V., Del Popolo A., Vavilova I. B. Chandra Xray galaxy clusters at z < 1.4. *Astron. Rep.*, 58(9):587–610 (2014).
- Babyk I., Vavilova I. The distant galaxy cluster XLSSJ022403.9-041328 on the LX-TX-M scaling relations using Chandra and XMM- Newton observations. *Astrophys. Space Sci.*, 353(2):613–619 (2014).
- Babyk I., Vavilova, I. The Chandra X-ray galaxy clusters at z < 1.4: constraints on the evolution of LX-T Mg relations. *Astrophys. Space Sci.*, **349**(1): 415–421 (2014).
- Barstow M. A., Bond H. E., Holberg J. B., et al. Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer lines in Sirius B. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 362: 1134–1142 (2005).
- Brault J. W. The gravitational redshift in the Solar spectrum. Doctoral dissertation. Princeton Univ, 1962, Abstract: Bull. Amer. Phys. Soc., 8: 28 (1963).
- Burgay M., D'Amico N., Possenti A., et al. An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system. Nature, 426: 531–533 (2003).
- Cacciapuoti L., Salomon Ch. Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment. *The European Physical Journal Special Topics*, 172: 57–68 (2009). DOI: 10.1140/epjst/e2009-01041-7 (2009).
- 25. Cottam J., Paerels F., Mendez M. Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star. *Nature*, **420**: 51–54 (2002).
- Cuesta H. J. M., Salim J. M. Non-linear electrodynamics and the gravitational redshift of highly magnetized neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 354: L55–L59 (2004). doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08375.x
- Damour T., Taylor J. H. On the orbital period change of the binary pulsar RSR 1913+16. *Astroph. J.*, 366: 501–511 (1991).
- Demorest P. B., Pennucci T., Ransom S. M., et al. A twosolar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature*, 467 (7319): 1081–1083 (2010).
- Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. Ann. Phys., 35:898–908 (1911).
- Godone A., Novero C., Tavella P. Null gravitational redshift experiment with nonidentical atomic clocks. *Phys. Rev. D.*, **51**: 319–323 (1995).
- 31. Guinot B. Time scales in the context of general relativity. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, **369**(1953): 4131–4142 (2011).
- Hafele J. C., Keating R. E. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains. *Science* (14.07.1972), 177(4044): 166–168 (1972).
- 33. Hogan M. T., McNamara B. R., Pulido F. A., et al. The Onset of Thermally Unstable Cooling from the Hot Atmospheres of Giant Galaxies in Clusters: Constraints on Feedback Models. Astrophys. J., 851(1), article id. 66, 20 pp. (2017).

- Hulse R. A., Taylor J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys. J. Lett.*, **195**: L51–L53 (1975).
- 35. Iyer B. R., Bhawal B. Black holes, gravitational radiation and the Universe. Essays in honor of C.V. Vishveshwara. Springer-Science+Business Media, B.V. (1999)
- Kasliwal M. M., et al. Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger. Science (16 October 2017), eprint *arXiv*:1710.05436 (2017).
- Kramer M., Stairs I. H., Manchester R. N., et al. Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar. *Science*, 314(5796):97–102 (2006).
- Laurent Ph., Massonnet D., Cacciapuoti L., Salomon Ch. The ACES/PHARAO space mission. C. R. Phys., 16(5): 540-552 (2015).
- Lyne A. G., Burgay M., Kramer M., et al. A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics. *Science*, 303(5661): 1153–1157 (2004).
- 40. Masachika I., Tadayasu D., Masanobu O., Yoshitomo M., Hideyuki M., Shigetaka S. Estimation of the surface gravitational redshift of a neutron star with the broad spectral feature detected during the thermonuclear X-ray Burst. Retrieved from: http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/ nstar/content/files/NSMAT2016/Presentation/Iwai\_ NSMAT2016.pdf.
- Meynadier F., Delva P., le Poncin-Lafitte C., Guerlin C., Wolf P. Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) data analysis. arXiv 1709.06491v1 (2017)
- Overduin, J. (2007, December). Testing Einstein. Retrieved from https://einstein.stanford.edu/SPACETIME/ spacetime3.html
- 43. Pound R. V., Rebka G. A. Apparent weight of photons. *Phys. Rev. Lett.*, **4**(7): 337–341(1960).
- Pound R. V., Snider J. L. Effect of Gravity on Nuclear Resonance. *Phys. Rev. Lett.*, **13**(18): 539–540(1964).
- Procyk R., Truong B. Gravitational Redshift. Retrieved from http://www.physics.brocku.ca/Courses/1P22\_DAgostino/samples/GravRed.pdf
- 46. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., et al. The 2MIG isolated AGNs – I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 447(3): 2209–2223(2015).
- Rafikov R. R., Lai D. Effects of Pulsar Rotation on Timing Measurements of the Double Pulsar System J0737-3039. *Astrophys. J.*, 641: 438–446 (2006).
- Ransom S. M., Stairs I. H., Archibald A. M., et al. A millisecond pulsar in a stellar triple system. *Nature*, 505: 520–524 (2014).
- 49. Sanwal D., Pavlov G. G., Zavlin V. E., Teter M. A. Discovery of absorption features in spectrum of an isolated neutron star. *Astroph. J.*, **574**: L61–L64 (2002).
- 50. Šimkoviě S., Teleki A. Vssualization of the X-ray by gravitational redshift.https://conferences.ukf.sk/index.php/ phdconf/phdconf2012/paper/download/977/287

- Shild A. Gravitational theories of the Whitehead type and the Principle of Equivalence. In: *Evidence for Gravitational theories*, Ed. Muller C. – New York: Academic Press, 1962.
- Sigurdsson S., Richer H. B., Hansen B. M., et al. A young white dwarf companion to pulsar B1620–26: evidence for early planet formation. *Science*, **301**: 193–196 (2003).
- Thorsett S. E., Arzoumanian Z., Camilo F., Lyne A. G. The triple pulsar system PSR B1620–26 in M4. *Astrophys. J.*, 523: 763–770 (1999).
- 54. Touboul P., Metris G., Rodrigues M., et al. MICRO-SCOPE mission: first results of a space test of the Equivalence Principle. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, article 231101 (2017).
- 55. Trimble V., Barstow M. Gravitational redshift and White Dwarf stars (2010). Einstein Online, 04. Retrieved from http://www.einstein-online.info/spotlights/redshift\_ white\_dwarfs University of Illinois (November, 1995).
- Vavilova I. B., Bolotin Yu. L., Boyarsky A. M., et al. Dark matter: Observational manifestation and experimental searches. Kyiv, Akademperiodyka, 375 P. (2015).
- 57. Vavilova I. B., Vasylenko A. A., Babyk Iu. V., Pulatova N. G. X-Ray Spectral Properties of the Isolated AGNs: NGC 1050, NGC 2989, ESO 317-038, ESO 438-009. *Odessa Astron. Publ.*, 28: 150–153 (2015).
- Vessot R. F. C., Levine M. V. A test of the equivalence principle using a space-born clock. *Gen. Rel. Grav.*, 10: 181 (1979).
- 59. Vessot R. F. C., Levine M. V., Mattison E. M., et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser. *Phys. Rev. Lett.*, **45**: 2081–2084 (1980).
- 60. Wilhelm K., Dwivedi B.N. 2013 On the Gravitational redshift. arxiv.org/abs/1708.06609
- 61. Will C. M. Theory and experiment in gravitational physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.
- 62. Will C. M. The confrontation between General Relativity and experiment. *Astroph. Space Sci.*, **283**(4): 543–552 (2003).
- 63. Will C. M. The confrontation between General Relativity and Experiment. In: General Relativity and John Archibald Wheeler, P.73–93. Eds. Ciufolini I., Matzner R. *Springer*, 547 p. (2010).
- Wojtak R., Hansen S. H., Hjorth J. Gravitational redshift of galaxies in clusters as predicted by general relativity. *Nature*, 477: 567–569 (2011).
- Zhao Xian-Feng. The surface gravitational redshift of the neutron star PSR J1614-2230. *Acta Physica Polonica B*, 44(2): 213–219 (2013).
- Zhao Xian-Feng and Jia Huan-Yu. The surface gravitational redshift of the massive neutron star PSR J0348+0432. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 50: 103–108 (2014).
- Zhu Hongyu, Alam Shadab, Croft Rupert A. C., et al. Nbody simulations of gravitational redshifts and other relativistic distortions of galaxy clustering. arXiv:1709.07859 (2017).

- 68. Giammichele N., Charpinet S., Fontaine et al. A large oxygen-dominated core from the seismic cartography of a pulsating white dwarf. *Nature. Letters*, 07 November 2017, doi:10.1038/nature25136
- 69. Savchenko V., Ferrigno C., Kuulkers E., et al. INTE-GRAL detection of the first prompt gamma-ray signal coincident with the gravitational-wave event GW170817. *Astrophys. J. Let.*, **848**(2), L15 (2017).

Received 18.01.18

# И.Б.Вавилова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

# ЭФФЕКТ ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ: ПРОВЕРКИ В НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Представлен краткий обзор экспериментов по проверке эффекта гравитационного красного смещения (ГКС) в наземных и космических экспериментах. В частности, рассмотрены эффект ГКС в гравитационном поле Земли, планет-гигантов Солнечной системы, компактных звезд (белые карлики и нейтронные звезды), где эффект подтверждается с большой точностью. Отдельно обсуждаются возможности проверки ГКС для галактик и скоплений галактик в оптическом и рентгеновском диапазонах электромагнитного спектра.

*Ключевые слова*: гравитационное красное смещение, общая теория относительности, навигационные системы, компактные звезды, скопления галактик.

# I. B. Vavilova

Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## TESTS OF THE GRAVITATIONAL REDSHIFT EFFECT IN SPACE-BORN AND GROUND-BASED EXPERIMENTS

This paper provides a brief overview of experiments as concerns with the tests of the gravitational redshift (GRS) effect in ground-based and space-born experiments. In particular, we consider the GRS effects in the gravitational field of the Earth, the major planets of the Solar system, compact stars (white dwarfs and neutron stars) where this effect is confirmed with a higher accuracy. We discuss availabilities to confirm the GRS effect for galaxies and galaxy clusters in visible and X-ray ranges of the electromagnetic spectrum.

*Keywords*: gravitational redshift, General Relativity Theory, navigation systems, compact stars, galaxy clusters.

doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2018.01.049

УДК 533.6.011.6+523.682

## Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина

# ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РУМЫНСКОГО МЕТЕОРОИДА. 1

Проведено комплексное моделирование процессов во всех геосферах, вызванных падением и взрывом типичного метеороида, имевшим место над Румынией 7 января 2015 г. Оценены механические, оптические, газодинамические и тепловые эффекты, сопровождавшие падение румынского метеороида. Показано, что основное энерговыделение (около 1 ТДж) происходило вблизи высоты 44 км, где скорость потерь массы достигала примерно 14.5 m/c, мощность оптического свечения — около 1 ТВт. Вблизи эпицентра взрыва метеороида давление во фронте ударной волны составляло несколько десятков паскалей. Пролет космического тела привел к образованию газопылевого плюма. Нагретый след от метеороида остывал в течение нескольких секунд.

**Ключевые слова:** метеороид, взаимодействие с атмосферой, механические, оптические, газодинамические и тепловые эффекты, газопылевой плюм

# введение

В последнее время проблеме астероидно-кометной угрозы уделяется значительное внимание. Регулярно проводятся научные конференции, опубликованы сотни статей и ряд книг (см., например, [3, 18, 19, 21, 22]). Благодаря популяризации этой проблемы все большее число жителей планеты осознает, что мы живем фактически в космосе, на малой и уязвимой планете.

Ввиду уникальности события и значимости его последствий актуальной задачей является детальное и всестороннее изучение эффектов падения на Землю каждого достаточно крупного космического тела. Новый всплеск интереса к эффектам метеороидов был связан с падением Челябинского космического тела [1, 4, 16, 17, 20, 23—27, 29, 31, 32, 36, 37].

Другим примером подобного, но менее масштабного события является пролет и взрыв на высоте около 42-45 км Румынского метеороида [26, 28, 38] (см. также http://neo.jpl.nasa.gov/news/ firebakk 130301.html). Полет и взрыв румынского космического тела над населенными пунктами сопровождался яркой вспышкой, регистрацией его видеокамерами, микробарографами и сейсмографами. Метеороид вторгся в атмосферу Земли 7 января 2015 г. в 01:05:56 UT. Космическое тело двигалось с юго-запада на северо-восток (азимут составлял около 211°) под углом к горизонту  $\alpha \approx 59.6^{\circ}$ . Начальная масса тела  $m_0 \approx 2.6$  т, начальная скорость v<sub>0</sub> ≈ 35.7 км/с, а начальный диаметр тела *d*<sub>0</sub> ≈ 1.15 м [26, 28, 38]. Высота взрыва метеороида (по данным НАСА  $z_{\rho} \approx 45.5$  км, по данным [38] — 42 км) и его кинематические характеристики свидетельствуют о том, что он, скорее всего, был каменным, поскольку кометные

<sup>©</sup> Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2018

тела таких размеров разрушаются на больших высотах, а железные могут достигать поверхности земли (см. ниже). К сожалению, автору неизвестно, найдены ли фрагменты тела на поверхности Земли. Согласно недавно появившейся работе [28] угол  $\alpha \approx 43^\circ$ , а  $z_{\rho} \approx 42.8 \pm 0.1$  км.

Цель настоящей работы — оценка механических, оптических, газодинамических и тепловых эффектов, сопутствовавших падению Румынского метеороида.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, Сопровождавшие падение метеороида

Падение достаточно крупных метеороидов сопровождается целым комплексом физических процессов [5, 18]. Кинетическая энергия метеороида в процессе его полета частично расходуется на образование цилиндрической ударной волны. За фронтом ударной волны происходит нагревание воздуха в ударно-сжатом слое, возбуждение колебаний молекул, их диссоциация и ионизация, т. е. образование плазмы. Определенная часть кинетической энергии частиц воздуха за фронтом ударной волны передается метеороиду за счет конвективного переноса. Электроны плазмы передают космическому телу часть энергии за счет теплопроводности. Нагретый воздух излучает электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Энергия излучения обеспечивает нагревание и испарение вещества метеороида, прогревание, расширение и разлет паров вещества метеороида, нагревание и ионизацию воздуха перед фронтом ударной волны. Разлет паров дает свой вклад в ударную волну. Непоглощенная часть излучения высвечивается преимущественно в оптическом диапазоне.

Увеличение силы сопротивления воздуха, обусловленное увеличением давления атмосферы, приводит к взрывоподобному преобразованию кинетической энергии, полному разрушению космического тела и генерации взрывной ударной волны. Деление на цилиндрическую и взрывную, близкую по своей структуре к сферической, волны является удобным с методической точки зрения [35]. На самом деле в процессе падения космического тела генерируется единая ударная волна. Образовавшаяся при движении метеороида ударная волна расширяется в стороны от траектории тела, постепенно затухая. Достигая поверхности Земли, интенсивная ударная волна от космического тела может производить механические повреждения, разрушения и землетрясения. Световая вспышка вызывает нагрев, ожоги, и даже пожары при достаточной энергии.

Остатки метеороида, двигаясь с дозвуковой скоростью, обычно выпадают на поверхность Земли.

Движение достаточно крупных космических тел, сопровождаемое генерацией ударных волн, приводит к образованию нагретого турбулентного следа в атмосфере. После взрывоподобного выделения энергии на заключительной стадии торможения часть продуктов взрыва всплывает вверх, а также вдоль разреженного следа. Образуется так называемый газопылевой плюм [18]. Нагретый след релаксирует в течение длительного времени (единицы часов).

Тепловые и ударно-волновые процессы при движении метеороида, а также плюма сопровождаются механическими, гидродинамическими, световыми, плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными, акустическими и сейсмическими возмущениями, которые подробнее рассматриваются ниже.

# ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Взаимодействию метеороидов с атмосферой посвящено большое количество работ [6-9, 14, 19, 21, 22, 32, 33 и др.]. В работе [14] изучены особенности движения и разрушения метеороидов в атмосфере, детально разработана теория дробления метеоритов. Дробление малых астероидов и сопутствующие эффекты исследовались в работе [33]. Развитие теории и физического механизма квазинепрерывного дробления метеороидов представлено в работах [7-9, 33]. В работе [19] исследуются механизмы разрушения, связанные с поверхностным испарением и поверхностным терморазрушением. Книга [21] посвящена применению достижений физико-химической динамики к анализу метеороидов. В монографии [22] приведены количественные оценки основных эффектов, возникающих при падении крупных космических тел на Землю.

Движение метеороида диаметром не более 1...10 м (при бо́льших размерах необходимо решать систему газодинамических уравнений) в атмосфере Земли описывается известными уравнениями [5, 19]:

$$m\frac{dv}{dt} = -\frac{C_d}{2}\rho v^2 S + mg \sin\alpha \quad , \tag{1}$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_h}{2Q} \rho v^3 S , \qquad (2)$$

$$mv\frac{d\alpha}{dt} = mg\cos\alpha - \frac{mv^2}{R_E}\cos\alpha - \frac{C_L}{2}\rho v^2 S, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin\alpha , \qquad (4)$$

$$I = -\frac{\tau_I}{2} \frac{d}{dt} m v^2, \qquad (5)$$

$$\alpha_i = -\frac{\beta_i}{M_m v} \frac{dm}{dt}, \qquad (6)$$

где *т* и *v* — масса и скорость тела, *S* — площадь сечения (мидель) метеороида, *g* — ускорение свободного падения,  $\alpha$  — угол между касательной к траектории и горизонтом, *C<sub>d</sub>* и *C<sub>L</sub>* — коэффициенты динамического сопротивления и подъемной силы, *C<sub>h</sub>* — коэффициент теплообмена, *Q* — удельная теплота сублимации, *R<sub>E</sub>* — радиус Земли,  $\rho$  — плотность атмосферы на высоте *z*,  $\tau_I$  — коэффициент светимости,  $\alpha_i$  — линейная концентрация электронов,  $\beta_i$  — коэффициент ионизации, *M<sub>m</sub>* — масса молекулы метеороида.

Уравнения (1)—(6) описывают торможение, потерю массы космическим телом, изменение угла наклона траектории и высоты тела, а также мощность его свечения и эффект ионизации.

Оценки показывают, что влиянием силы тяжести можно пренебречь вплоть до высоты взрыва  $z_e$ , которая, как будет показано ниже, примерно равнялась 44 км. При расчетах далее пренебрегалось также изменением угла  $\alpha$  вплоть до высоты 41 км. Считалось, что начальная форма тела близка к шарообразной. Полагалось, что коэффициенты  $C_d$ ,  $C_h$  и  $\tau_i$  в процессе движения тела оставались неизменными. Учитывалось дробление метеороида и изменение S(z). Исключая при помощи (4) время из соотношений (1) и (2), получим следующую систему уравнений:

$$m\frac{dv}{dz} = \frac{C_d}{2\mathrm{sin}\alpha}\rho vS\,,\tag{7}$$

$$\frac{dm}{dz} = \frac{C_h}{2Q \sin\alpha} \rho v^2 S .$$
(8)

Для экспоненциальной модели атмосферы [13]

$$\rho(z) = \rho(0) \mathrm{e}^{-z/H}$$

где  $H \approx 7.5$  км — приведенная высота атмосферы,  $\rho(0) \approx \rho|_{z=0}$ .

*Кинематические критерии*. Из соотношений (7) и (8) следуют безразмерные критерии обтекания и выпадения космического тела:

$$\alpha_b = \frac{C_d}{2} \frac{\rho(0) S_0 H}{m_0 \sin \alpha}, \qquad (9)$$

$$\beta_b = \frac{C_h}{2C_d} \frac{v_0^2}{Q}, \qquad (10)$$

где  $S_0 = \pi d_0^2 / 4$  — начальное значение миделя.

Обычно коэффициент  $\alpha_b$  именуют баллистическим коэффициентом, а коэффициент  $\beta_b$  — параметром уноса массы.

Положим в уравнениях (9) и (10)  $\rho(0) = 1.3 \text{ кг/м}^3$ ,  $S_0 \approx 1.0 \text{ м}^2$ ,  $H_0 \approx 7.5 \text{ км}$ ,  $m_0 \approx 2.6 \text{ т}$ ,  $\alpha \approx 43^\circ$  или 60°,  $v_0 \approx 35.7 \text{ км/с}$ . Будем считать, что  $C_d \approx 1$ ,  $C_h = 4.5 \cdot 10^{-3}$  и Q = 1.5 МДж/кг [5, 18]. Тогда получим, что  $\alpha_b \approx 5.5$  или 4.4,  $\beta_b \approx 1.9$ .

Известно, что при  $\alpha_b > 1$  космическое тело сильно тормозится (фактически до остановки), а при  $\beta_b > 1$  практически полностью разрушается и испаряется [15, 22]. Добавим, что критерий  $\alpha_b$ , даваемый соотношением (9), справедлив для монолитного космического тела. Если же имеет место дробление тела, мидель облака фрагментов  $S >> S_0$ , и значение  $\alpha_b$  существенно увеличивается. Именно такая ситуация наблюдалась для Румынского метеороида.

Таким образом, при падении Румынского метеорита произошло его полное разрушение и взрывоподобное выделение энергии в атмосфере.

Энергетические оценки. По данным НАСА начальная кинетическая энергия космического тела

$$E_{k0} = \frac{m_0 v_0^2}{2}$$

близка к 1.66 ТДж. Такая энергия выделяется при взрыве 0.4 кт тринитротолуола. Энергия взрыва Румынского метеороида была в 30 раз меньше энергии взрыва бомбы, сброшенной в 1945 г. на Хиросиму.

Основное выделение энергии падающего космического тела происходит в слое атмосферы толщиною

$$L = \frac{H}{\sin \alpha}$$

При  $H \approx 7.5$  км и  $\alpha = 43^{\circ}$  либо  $\alpha = 59.6^{\circ}$  имеем  $L \approx 8.7$  или 11 км. Тогда средняя погонная плотность энергии при среднем значении  $L \approx 10$  км

$$E_L = \frac{E_{k0}}{L} \approx 1.7 \cdot 10^8 \, \text{Дж/м.}$$

Характерное время энерговыделения равно

$$\tau_e = \frac{L}{v_0} \approx 0.3 \text{ c}$$

При этом характерная мощность процесса

$$P_c \approx \frac{E_{k0}}{\tau_e} \approx 5.9$$
 TBT.

Поскольку

$$E_k = \frac{m}{2}v^2$$

текущая мощность процесса равна

$$P = \frac{d E_k}{d t} = m v \frac{d v}{d t} + \frac{v^2}{2} \frac{d m}{d t},$$

или при dl = vdt

$$\frac{dE_k}{dl} = m\frac{dv}{dt} + \frac{v}{2}\frac{dm}{dt}.$$
 (11)

Первое слагаемое в соотношении (11) представляет собой погонную энергию  $E_b$ , затрачиваемую на торможение, второе слагаемое — погонную энергию  $E_a$ , обеспечивающую процесс абляции. Отношение этих погонных энергий равно

$$\frac{E_a}{E_b} = \frac{v(dm/dt)}{2m(dv/dt)} = \frac{v}{2m}\frac{dm}{dv}$$

С учетом (7) и (8)

где

$$\frac{E_a}{E_b} = \frac{v^2}{v_c^2}$$

$$v_c = \sqrt{\frac{2C_d}{C_h}Q} = \sqrt{\frac{2}{\sigma_a}}$$

— характерная скорость,  $\sigma_a = C_h / C_d Q$  — параметр абляции [5, 14, 19]. При указанных выше значениях  $C_h, C_d$  и Q скорость  $v_c \approx 25.8$  км/с.

Если  $v \approx v_0 \approx 35.7$  км/с, то до существенного торможения тела  $E_a/E_b \approx 1.9$ . Таким образом, в начале траектории погонная энергия  $E_a$  примерно в 1.9 раза превышала энергию  $E_b$ . В процессе движения метеороида отношение  $E_a/E_b$  уменьшалось на несколько порядков (табл. 1).

Область взрывоподобного выделения энергии имеет протяженность  $L_e < L$ . Оценим  $L_e$ , исходя из диапазона высот  $\Delta z_e$ , где кинетическая энергия метеороида при неизменной массе уменьшается от  $0.9E_{k0}$  до  $0.1E_{k0}$ , а его скорость от  $v_1 = 0.948 v_0$  до  $v_2 = 0.316 v_0$ . Как показано в работе [32],

Таблица І	. Высотная зависимости	<ul> <li>плотности атмосферы,</li> </ul>	кинематических и энергетич	еских параметров метеороида

<i>z</i> , км	ρ, г/м <sup>3</sup>	υ, км/с	т, т	<i>Е</i> <sub><i>k</i></sub> , ТДж	<i>dE<sub>k</sub>/dz</i> , ГДж∕м	<i>d</i> , м	<i>S</i> , м <sup>2</sup>	<i>− ṁ</i> , т/с	- <i>m</i> <sup>,</sup> , MH	<i>− vṁ /</i> 2, MH	$-(m\dot{v}+v\dot{m}/2),$ MH	<i>I</i> , ГВт	<i>—Р</i> , ТВт
41	5.5	0.5	0.41	0.001	0.01	19.9	310	0.0003	0.2	0.00075	0.2	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4}$
42	4.8	7.1	0.42	0.01	0.23	16.6	216	0.56	26.1	2	28.1	16.4	0.2
43	4.2	23.2	0.88	0.24	0.50	13.6	146	11.5	165	133.4	298.4	566	6.9
44	3.7	30.6	1.58	0.74	0.46	10.8	91	14.5	158	221.9	380.7	951	11.6
45	3.2	33.6	2.42	1.20	0.35	8.1	52	9.5	94	159.6	253.6	697	8.5
46	2.8	35.2	2.50	1.55	0.06	5.6	25	4.6	43.4	81	124.4	361	4.4
47	2.5	35.4	2.57	1.61	0.05	3.3	8.7	1.4	13.6	24.8	38.4	11.5	0.14
48	2.1	35.7	2.60	1.66	0	1.15	1	0.14	1.2	2.5	3.7	10.7	0.13

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

$$v = v_0 \mathrm{e}^{-\alpha_v r^2}, \qquad (12)$$

где

$$\alpha_v = \frac{B^2}{2C^2},$$
  
$$B = \frac{C_d \rho(z_0) S_0 H}{m_0 \sin \alpha},$$
  
$$C^2 = \frac{3C_d d_0 \sin \alpha}{16 H},$$

 $r = e^{-x} - 1$ ,  $x = (z - z_0) / H$ ,  $z_0$  — высота начала существенного разрушения. При  $C_d \approx 1$ ,  $\rho(z_0) \approx 1.14$  г/м<sup>3</sup>,  $H \approx 7.5$  км,  $\rho_b \approx 3.3$  т/м<sup>3</sup>,  $d_0 \approx 1.15$  м,  $z_0 \approx 46$  км (см. далее) имеем  $B \approx 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $C_2 \approx 2.5 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_v \approx 0.18$ . Если же  $\alpha \approx 43^\circ$ , то  $\alpha_v \approx 0.48$ . При этом из соотношения (12) получим

$$r_1 = r(z_1) = \sqrt{\frac{1}{\alpha_v} \ln \frac{v_0}{v_1}} \approx 0.54$$

при  $\alpha \approx 60^{\circ}$ , или  $r_1 \approx 0.33$  при  $\alpha \approx 43^{\circ}$ ,

$$r_2 = r(z_2) = \sqrt{\frac{1}{\alpha_v} \ln \frac{v_0}{v_2}} \approx 2.53$$

при <br/>  $\alpha \approx 60^\circ,$ или же $r_2 \approx 1.55$  при <br/>  $\alpha \approx 43^\circ.$ 

Тогда

$$\Delta z_e = H \ln \frac{1 + r_2}{1 + r_1} \approx 0.65 H \approx 6.2 \text{ Km}$$

при  $\alpha \approx 60^{\circ}$ . Если же  $\alpha \approx 43^{\circ}$ , то  $\Delta z_e \approx 4.9$  км. Следовательно,  $L_e$  составляет 7.1 км при  $\alpha \approx 60^{\circ}$  или 7.2 км при  $\alpha \approx 43^{\circ}$ . Обе оценки близки друг к другу.

Кинетическая энергия космического тела расходуется на его дробление, нагревание, плавление, абляцию, ионизацию, нагревание вещества в следе, а также на образование цилиндрической и взрывной ударных волн. Оценим некоторые из энергий.

При удельной энергии абляции Q и массе уносимого вещества  $\Delta m$  связанная с абляцией энергия  $E_{Q0} \approx Q\Delta m$ . При указанных выше значениях Q и  $\Delta m \approx m_0$  имеем  $E_{Q0} \approx 3.9$  ГДж. Поскольку заведомо  $\Delta m < m_0$ , реально энергия  $E_Q$  всегда меньше  $E_{Q0}$ .

Если удельная энергия дробления каменного космического тела составляет  $\varepsilon_d = 10^4 \dots 10^5 \, \text{Дж/кг}$ , полная энергия дробления  $E_d = \varepsilon_d m_0 \approx 26 \dots 260 \, \text{МДж}$ . Легко показать, что полное число ионизированных атомов (молекул)  $N_{i\Sigma} \approx 3.8 \cdot 10^{28}$ . Действительно, число атомов в метеороиде  $N_{\Sigma} = m_0 / M_m$ . При коэффициенте ионизации  $\beta_i \approx 0.0154$  [5],  $M_m \approx 5 \cdot 10^{-26}$  кг и  $m_0 \approx 2.6$  т имеем  $N_{i\Sigma} = \beta_i N_{\Sigma} \approx 8 \cdot 10^{26}$ . При средней энергии, затрачиваемой на один акт ионизации нейтральной частицы, равной  $\varepsilon_i \approx 50$  эВ, имеем  $E_i = N_{i\Sigma}\varepsilon_i \approx 6.4$  ГДж.

На образование ударной волны расходуется существенная часть начальной кинетической энергии космического тела [18].

Значительная часть  $E_{k0}$  затрачивается на на-грев вещества в следе.

## КИНЕМАТИКА МЕТЕОРОИДА

Рассмотрим основные эффекты, сопровождавшие падение Румынского метеорита.

**Дробление метеороида.** Процесс дробления каждого метеороида — индивидуален. Будем считать, что имело место квазинепрерывное дробление. В верхней части траектории каменный метеороид испытывал шелушение, на высотах 48...42 км дробление. Первоначально шароподобное тело постепенно превращалось в блинообразное тело с поперечным сечением (миделем) S(z). Продукты дробления далее двигались как квазижидкость. При значительном (в разы, на порядок) увеличении S(z) произошло взрывоподобное выделение энергии. За этим последовала вспышка, высвечивание электромагнитной энергии преимущественно в оптическом диапазоне.

Теория дробления крупных метеороидов ( $d_0 = 1...100$  м) разработана в работах [6—9, 14, 32, 33].

Космическое тело разрушается при условии, что динамическое давление на него сравнивается с прочностью вещества тела  $\sigma_{\alpha}$  [18]:

$$0.365\rho v^2 = \sigma_d \,, \tag{13}$$

где  $\rho$  — плотность атмосферы, где имело место разрушение метеороида. При  $\rho(z) = \rho(0)\exp(-z/H)$  для высоты разрушения имеем следующее соотношение [18]:

$$z = H \ln \frac{0.365\rho(0)v^2}{\sigma_d}$$

Здесь  $\rho(0) \approx 1.3 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха у поверхности Земли.

Разные части метеороида имеют разную прочность, поэтому прочность каменного тела изменяется в широких пределах:  $\sigma_d = 1...10 \text{ MH/m}^2$  [8, 19]. Тогда условие (13) при  $v \approx 35.7 \text{ км/с и}$   $\sigma_d = 1 \text{ MH/m}^2$  выполняется соответственно на высотах, где  $\rho \approx 2.1 \text{ г/m}^3$ . Такому значению  $\rho$  соответствует высота 48 км.

После начала дробления осколки движутся как квазижидкость, приобретая поперечную скорость [6—9, 14, 18, 32, 33]:

$$v_t = k_v v \left(\frac{\rho}{\rho_b}\right)^{1/2}, \qquad (14)$$

где  $k_v \sim 1$  — коэффициент,  $\rho_b$  — плотность вещества метеороида. Далее положим, что  $k_v = 1$ ,  $\rho_b \approx 3.3 \text{ т/м}^3$ ,

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right) \equiv \rho_0 e^{-x}, \qquad (15)$$

где  $\rho_0 = \rho(z_0), z_0 = 48$  км,  $x = (z - z_0)/H$ .

Считая квазижидкость непрерывной и используя соотношения (4) и (14), вычислим приращение радиуса, расширяющегося в поперечном направлении образования («блина»):

$$dr_t = -\sqrt{\frac{\rho}{\rho_b}} \frac{dz}{\sin\alpha}$$

или, с учетом (15), -

$$dr_{t} = -\sqrt{\frac{\rho(z_{0})}{\rho_{b}}} \exp\left(-\frac{z-z_{0}}{2H}\right) \frac{dz}{\sin\alpha}, \quad (16)$$
$$r_{t}(z_{0}) = 0.$$

Интегрируя выражение (16), получим

$$r_{i} = r_{m} \left(e^{-x/2} - 1\right),$$
$$r_{m} = \frac{2H}{\sin\alpha} \sqrt{\frac{\rho(z_{0})}{\rho_{b}}}.$$

Тогда диаметр и площадь миделя при  $z \le z_0$  даются соотношениями

$$d(x) = d_0 + 2r_1(x) = d_0(1 + k_d(e^{-x/2} - 1)), \quad (17)$$

$$S(x) = \frac{\pi}{4} d^{2}(x) = S_{0} (1 + k_{d} (e^{-x/2} - 1))^{2}, \quad (18)$$

$$k_d = \frac{2r_m}{d_0} = \frac{4H}{d_0 \sin\alpha} \sqrt{\frac{\rho(z_0)}{\rho_b}} \quad . \tag{19}$$

Коэффициент  $k_d$  описывает степень уширения дробящегося метеороида. При  $d_0 \approx 1.15$  м, sin  $\alpha \approx 0.87$ ,  $\rho(z_0) \approx 2.1$  г/м<sup>3</sup>,  $\rho_b \approx 3.3$  т/м<sup>3</sup> из (18) имеем  $k_d \approx 23.9$ . Если  $\alpha \approx 43^\circ$ , то  $k_d \approx 30.5$ . При среднем значении  $\alpha \approx 51^\circ$  коэффициент  $k_d \approx 27.4$ . Именно это значение используется далее.

Результаты расчета d(x) и  $S(x) = \pi d^2/4$  по соотношениям (17) и (18) приведены в табл. 1, а  $k_d$  по соотношению (19) — в табл. 2. Видно, что высоте вспышки  $z_e \approx 45.5$  км соответствуют космические тела, для которых  $\sigma_d \approx 1...1.5$  МН/м<sup>2</sup>. Такими телами могут быть только каменные метеороиды. При указанных значениях  $\sigma_d$  практически полное торможение метеороида имело место в диапазоне высот около 3 км. Величина этого диапазона слабо зависела от  $\alpha$ . Поэтому далее выполнены расчеты для средних значений угла  $\alpha \approx 51^{\circ}$  и  $k_d \approx 30$ .

$\sigma H/w^2$	7 KM	ρ, Γ/Μ <sup>3</sup>	k <sub>d</sub>		$\Delta z_1$ , км		$\Delta z_2$ , км	
0 <sub>d</sub> , 11/ M	<i>λ</i> <sub>0</sub> , κΜ		$\alpha = 43^{\circ}$	$\alpha = 60^{\circ}$	$\alpha = 43^{\circ}$	$\alpha = 60^{\circ}$	$\alpha = 43^{\circ}$	$\alpha = 60^{\circ}$
104	82.6	0.0215	3.1	2.4	7.5	9.1	20.4	23.4
10 <sup>5</sup>	65.3	0.215	9.8	7.7	2.8	3.5	9.8	11.6
106	48	2.16	31	24.2	1	1.2	3.8	4.7
$1.5 \cdot 10^{6}$	45	3.2	37.8	29.5	0.8	1	3.2	4
$2\cdot 10^6$	42.8	4.3	43.8	34.2	0.7	0.9	2.8	3.5
107	30.1	21.6	98.1	77	0.3	0.4	1.4	1.75
108	13.5	216	310	242	0.1	0.125	0.4	0.6

*Таблица 2.* Параметры миделя в зависимости от прочности и угла входа в атмосферу космического тела ( $z_0$  — высота начала разрушения,  $\Delta z_1$ ,  $\Delta z_2$  — величина уменьшения высоты, на которой  $d/d_0$  составляет 3 и 10 соответственно)

Отдавая предпочтение данным НАСА, будем считать, что  $z_e \approx 45.5$  км, а  $z_0 = 48$  км.

*Скорость движения метеороида.* Разделив уравнение (8) на уравнение (7), получим соотношение, связывающее массу *m* и скорость *v* метеороида:

$$\frac{1}{m}\frac{d\,m}{d\,v} = \frac{C_h}{C_d}\frac{v}{Q} \equiv \frac{2v}{v_c^2}, \ m(v_0) = m_0.$$
(20)

Интегрирование (20) дает

$$m = m_0 e^{-(v_0^2 - v^2) / v_c^2}.$$
 (21)

С учетом (21) соотношение (7) примет вид

$$e^{-(v_0^2 - v^2)/v_c^2} \frac{dv^2}{v^2} = B \frac{S(x)}{S_0} e^{-x} dx, \quad v(0) = v_0, \quad (22)$$

где S(x) дается выражением (18),

$$B = \frac{C_d \rho(z_0) S_0 H}{m_0 \sin \alpha}$$
(23)

— баллистический коэффициент на высоте  $z_0$ . При указанных выше параметрах значение  $B \approx 0.55$ .

Выполняя интегрирование выражения (22), получим следующее уравнение для вычисления скорости метеороида:

$$\operatorname{Ei}(v) = \operatorname{Ei}(v_0) + F(x) ,$$

$$F(x) = B e^{v_0^2/v_c^2} \left[ (k-1)^2 (1-e^{-x}) - \frac{4}{3}k(k-1)(1-e^{-3x/2}) + \frac{k^2}{2}(1-e^{-2x}) \right]$$

где

$$\operatorname{Ei}(y) = \int_{-\infty}^{y} e^{y} \frac{dy}{y}$$

— интегральная показательная функция,  $v = v_c \sqrt{y}$ .

Результаты расчета v(z) с использованием соотношения (12) приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что основное уменьшение скорости метеороида имело место в окрестности высоты 42 км.

Потеря массы метеороидом. Зная v(z) и используя уравнение (8), можно вычислить изменение массы метеороида вдоль траектории (по высоте) и скорость ее потерь dm/dt. Уравнение (21) эквивалентно следующему соотношению [32]:

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

$$m = m_0 e^{-\sigma_a (v_0^2 - v^2)/2}$$
.

Положим, что  $m_0 \approx 2.6$  т,  $v_0 \approx 35.7$  км/с, а  $\sigma_a \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ c}^2/\text{м}^2$ . Результаты расчета текущей массы *m* и *dm/dt* также приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что наибольшие потери массы имели место на высотах 43...46 км, где они достигали примерно -14.5 т/с.

**Мощности торможения и свечения**. В табл. 1 приведены мощности торможения *P* и свечения *I*, а также их составляющие (-mdv/dt, -(vdm/dt)/2, их сумма). Видно, что наибольшее торможение (как и свечение) имело место в диапазоне высот от 43 до 46 км, т. е. основное выделение энергии происходило в диапазоне высот  $\Delta z_e \approx 3$  км. Это соответствует длине следа  $L_e = \Delta z_e/\sin \alpha$ . При среднем значении угла  $\alpha = 51^{\circ}$  имеем  $L_e \approx 3.9$  км. Здесь выделилось около 1.3 ТДж, или 80 % всей кинетической энергии. Максимальное значение  $dE_k/dz \approx 0.5$  ГДж/м. Указанное значение диапазона высот хорошо соответствует результатам наблюдений как спутниковых [https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/], так и наземных наблюдений [26, 28].

#### ЭФФЕКТ СВЕТИМОСТИ МЕТЕОРОИДА

Для оценки мощности светимости воспользуемся соотношением (5). Коэффициент светимости  $\tau_I$  существенно зависит от размера и массы метеорита. Для метеоритов мм-см-диапазонов  $\tau_I \approx$  $\approx 3 \cdot 10^{-4}...2 \cdot 10^{-2}$  [5, 14]. Для болидов  $\tau_I$ , зависящий от  $E_r$ , существенно больше [18, 21]. Оценим  $\tau_I$ , исходя из зависимости [18]

$$\tau_I = 0.1212 E_r^{0.115}$$
.

Отсюда  $E_{k0} = E_r / \tau_I = 8.2508 E_r^{0.885}$ . Здесь  $E_r$ , кт — интегральная энергия излучения. По данным НАСА  $E_r \approx 136 \cdot \Gamma Д \# \approx 0.0325$  кт ТНТ. Такое значение  $E_r$  определено при помощи сенсоров, установленных на геостационарных ИСЗ США [http://neo.jpl.nasa.gov/news/firebakk\_130301. html]. Тогда  $\tau_I \approx 8.2$  %, а  $E_{k0} \approx 1.66$  ТД $\# \approx 0.4$  кт ТНТ. При эффективной длительности импульса излучения  $\tau_r = L_e / \overline{v} \approx 0.13$  с, где средняя по высоте скорость  $\overline{v} \approx 30$  км/с,  $L_e \approx 3.9$ км, имеем среднюю мощность излучения

$$P_r = \frac{E_r}{\tau_r} \approx 1 \text{ TBT.}$$

При мощности  $|P(z_e)| \approx 11.6$  ТВт (см. табл. 1) получим, что

$$\eta_r = \frac{P_r}{\left|P(z_e)\right|} \approx 8.6 \%$$

T. e.  $\eta_r \approx \tau_I$ .

Оценим далее плотность потока энергии оптического излучения. Считая, что излучение истекает от цилиндрического объема, площадь поверхности которого при  $L_e >> \overline{d}(z_e) \approx 10$  м близка к  $S(z_e) \approx \pi \ \overline{d}(z_e) L_e \approx 1.2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ , получим, что

$$\Pi(z_e) = \frac{P_r}{S(z_e)} \approx 8.1 \text{ MBt/m}^2.$$

Плотность потока мощности вблизи эпицентра равна

$$\Pi_p(R) = \frac{P_r}{4\pi R^2} \exp(-R/L_r)$$

При R = 43 км,  $L_r = 25$  км имеем  $\Pi_p(R) \approx 7.7$  Вт/м<sup>2</sup>. Плотность потока света от метеороида была сопоставима с плотностью потока света от Солнца в зимнее дневное время (около 10...20 Вт/м<sup>2</sup>). Оценка потока света хорошо соответствует результатам наблюдений.

Если бы область взрыва имела свойства абсолютного черного тела, его температура при указанных значениях  $\Pi(z_e)$  давалась бы следующим соотношением:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\Pi(z_e)}{\sigma}},$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт · м<sup>-2</sup>К<sup>-4</sup> — постоянная Стефана — Больцмана. Тогда *T* ≈ 3500 К. При этом максимум излучения приходится на длину волны

$$\lambda = \frac{b}{T} \approx 840 \text{ HM}$$

Такое значение  $\lambda$  соответствует краю видимого диапазона. Здесь  $b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{K}$  — постоянная Вина.

Зная величину  $E_r$ , можно оценить потенциальную пожароопасность, обуславливаемую метеороидом. Вблизи эпицентра

$$\Pi_r = \frac{E_r}{4\pi R^2} \exp(-R/L_r),$$

где  $E_r \approx 136$  ГДж,  $L_r = 20...30$  км [3, 18]. Тогда вблизи эпицентра ( $R \approx 42$  км) при  $L_r = 25$  км имеем  $\Pi_r(R) \approx 1.1$  Дж/м<sup>2</sup>. Возгорание сухого вещества возникает при П<sub>min</sub> ≈ 2...10 МДж/м<sup>2</sup>. Так что пожары при взрыве Румынского тела жителям заведомо не грозили.

## ЭФФЕКТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Цилиндрическая ударная волна*. Полет метеороида с гиперзвуковой скоростью сопровождался генерацией цилиндрической ударной волны. Она начала генерироваться на высоте, где воздух для падаюшего тела представлял сплошную среду. Критерием «сплошности» является число Кнудсена Кп = = l/d << 1, где l — длина свободного пробега молекул воздуха, *d* — диаметр тела [5]. Цилиндрическая волна заметной интенсивности возникает при Кп  $\approx$  0.007...0.012. При  $d \approx d_0 \approx 1.15$  м это имело место на высоте  $z_{max} \approx 82...85$  км соответственно. На высотах *z* ≤ 46 км цилиндрическая волна накладывалась на взрывную ударную волну. Деление на цилиндрическую и взрывную волны достаточно условное. Первая из них менее интенсивная и своим конусом вытянута вдоль траектории.

Радиус цилиндрической волны дается следующим соотношением [35]:

$$R_c = Md$$
,

где М =  $v/v_s$  — число Маха, v и  $v_s$  — скорости космического тела и звука. При  $v \approx v_0 \approx 35.7$  км/с,  $v_s \approx 0.3$  км/с,  $d \approx d_0 \approx 1.15$  м имеем М  $\approx 119$  и  $R_c \approx 137$  км. Радиусу  $R_c$  соответствуют характерный и фундаментальный периоды [35] акустических колебаний:

$$T_c' = \frac{R_c}{v_s}, \ T_c = 2.81 \frac{R_c}{v_s}.$$
 (24)

*Таблица 3.* Зависимость периодов акустических колебаний, генерируемых цилиндрической и взрывной волнами, от пройденного расстояния (расчет)

<i>R</i> , км	<i>T'<sub>c</sub></i> , c	<i>T<sub>c</sub></i> , c	<i>T'<sub>e</sub></i> , c	<i>T<sub>e</sub></i> , c
50	1.0	3.1	3.3	9.3
100	1.3	3.6	3.9	11.1
300	1.7	4.8	5.2	14.6
500	1.9	5.5	5.9	16.6
1000	2.3	6.5	7.0	19.7
1500	2.6	7.2	7.8	21.8

Согласно работе [35] эти периоды за счет дисперсии увеличиваются по закону

$$T_{c}'(R) = 0.562T_{c}'(R_{c}) \left(\frac{R}{R_{c}}\right)^{1/4},$$

$$T_{c}(R) = 0.562T_{c}(R_{c}) \left(\frac{R}{R_{c}}\right)^{1/4}.$$
(25)

Результаты расчетов этих периодов приведены в табл. 3.

Выражение для зависимости относительного давления во фронте цилиндрической волны от расстояния *R* приведено в работе [35]:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{0.4503}{\left(1 + 4.803R^2/R_c^2\right)^{3/8} - 1} ,$$

где  $\gamma = 1.4$  — показатель адиабаты. Если же  $R^2 >> R_c^2$ , то это соотношение упрощается:

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 0.3 \left(\frac{R_c}{R}\right)^{3/4}.$$
 (26)

Выражения (24) и (26) справедливы лишь при удалении от источника в горизонтальном направлении, так как они не учитывают экспоненциальное убывание атмосферного давления pпри увеличении высоты z [13]:

$$p(z) = p(0)e^{-z/H}$$
, (27)

где  $p(0) \approx 10^5 \Pi a$  — давление на поверхности Земли, т. е. при z = 0, H — приведенная высота атмосферы. В общем случае H = H(z), и тогда p в соотношении (26) следует заменить на выражение [13]

$$p(z) = p(0) \exp\left(-\int_{0}^{z} \frac{dz}{H(z)}\right).$$
(28)

Если высоту отсчитывать от высоты взрыва  $z_e$ , то

 $I = \int_{z_1}^{z} \frac{dz}{H(z)} \, .$ 

 $\Delta p \propto \exp\left(-\int_{-\infty}^{z} \frac{dz}{2H}\right),$ 

В экспоненциальной атмосфере [13]

$$p(z) = p(z_e) \exp\left(-\int_{z_e}^{z} \frac{dz}{H(z)}\right) \equiv p(z_e) e^{-I}, \quad (29)$$

где

$$p \propto \exp\left(-\int_{z_e}^{z} \frac{dz}{H}\right).$$

Тогда (26) с учетом (29) преобразуется к виду:

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 0.3 \left(\frac{R_c}{R}\right)^{3/4} e^{1/2} \,.$$

В частности, у поверхности Земли при  $z_e \approx 43$  км,  $R \approx 53$  км,  $R_c = 137$  м и значении экспоненты  $6.9 \cdot 10^{-2}$  имеем  $\Delta p/p \approx 1.5 \cdot 10^{-4}$ , а  $\Delta p(0) \approx 15$  Па. При  $z_{\text{max}} \approx 72...75$  км значение экспоненты примерно равно  $10^{-2.3}$ , тогда на поверхности земли отношение  $\Delta p/p \approx 1.4 \cdot 10^{-5}$ , а  $\Delta p(0) \approx 1.4$  Па. Из этих оценок следует, что амплитуда акустического сигнала, обусловленного цилиндрической волной в эпицентре взрыва, близка к 1.4...15 Па, т. е. при уменьшении высоты от 72...75 до 42 км амплитуда цилиндрической волны увеличивается примерно в 10 раз.

По мере удаления от траектории метеороида цилиндрическая волна по своей структуре постепенно приближается к структуре сферической волны, для которой  $\Delta p(R) \propto R^{-1}$ . Это происходит на расстояниях  $R \gg (z_{\text{max}} - z_e)/\sin\alpha \approx 46...50$  км, где  $z_e \approx 43$  км.

**Взрывная ударная волна.** Будем полагать, что взрывоподобное выделение энергии имело место на длине траектории метеороида, равной  $L_e = \Delta z_e/\sin\alpha \approx 3.9$  км. Тогда погонная плотность энергии  $E_L = E_e/L_e \approx 0.8E_{k0}/L_e \approx 3.3 \cdot 10^8$  Дж/м.

Будем считать, что основное взрывоподобное энерговыделение имело место вблизи высоты  $z_e \approx 43$  км. Считая взрыв цилиндрическим, вычислим радиус ударной волны из следующего соотношения:

$$R_e = \sqrt{\frac{E_L}{\pi p(z_e)}},$$

где  $p(z_e) \approx 164 \, \Pi a$  — давление атмосферы на высоте максимального энерговыделения. При  $E_L \approx 0.33 \, \Gamma Дж/м$  имеем  $R_e \approx 0.8 \, \text{км}$ , диаметр  $2R_e \approx 1.6 \, \text{км}$ . Таким образом, размеры огненного эллипсоида составляли  $3.9 \times 1.6 \times 1.6 \, \text{км}$ . При таких размерах взрывная ударная волна, строго говоря, не является сферической, она все же ближе к цилиндрической.

Результаты расчета характерного и фундаментального периодов по соотношениям (25) с заменой  $R_c$  на  $R_\rho$  приведены в табл. 3.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

в ударной возн	e		
Ζ, КМ	<i>p</i> <sub>0</sub> , Па	$\Delta p/p_0$	$\Delta p, \Pi a$
0	10 <sup>5</sup>	$3.8 \cdot 10^{-4}$	43.1
5	$5.1 \cdot 10^4$	$7.1 \cdot 10^{-4}$	36.4
10	$2.6 \cdot 10^4$	$11.7 \cdot 10^{-4}$	30
15	$1.4 \cdot 10^4$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	26.6
20	$6.9 \cdot 10^{3}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	22
25	$3.6 \cdot 10^3$	$6.2 \cdot 10^{-3}$	20
30	$1.8 \cdot 10^{3}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	22
35	$9.4 \cdot 10^2$	3.6 • 10-2	36
39	$5.5 \cdot 10^2$	$6.7 \cdot 10^{-2}$	37

Таблица 4. Высотная зависимость давления в ударной волне

Tаблица 5. Высотные зависимости давления в ударной волне, плотности, приведенной высоты Hи давления в невозмущенной атмосфере

<i>z</i> , км	ρ <sub>0</sub> , кг/м <sup>3</sup>	2 <i>Н</i> , км	<i>р</i> <sub>0</sub> , Па	$\Delta p/p_0$	Δ <i>р</i> , Па
50	$1.7 \cdot 10^{-3}$	15	70	0.09	6.3
60	$4.4 \cdot 10^{-4}$	15	10	0.075	0.75
70	$1.1 \cdot 10^{-4}$	16	3	0.08	0.24
80	$3 \cdot 10^{-5}$	17	1	0.14	0.11
90	8 · 10 <sup>-6</sup>	18	0.3	0.15	0.06
100	$2.1 \cdot 10^{-6}$	19	0.1	0.21	0.02
120	$2.1 \cdot 10^{-7}$	21	$10^{-2}$	0.48	$4.8 \cdot 10^{-3}$
150	$2.1 \cdot 10^{-8}$	26	$10^{-3}$	1.08	$1.1 \cdot 10^{-3}$
200	$2.1 \cdot 10^{-9}$	44	10-4	2.3	2.3.10-4
300	$2.1 \cdot 10^{-10}$	87	$10^{-5}$	4.5	$4.5 \cdot 10^{-5}$

Вблизи области взрыва цилиндрическая волна является существенно нелинейной. Ее амплитуда убывает по закону $\Delta p(R) \propto 1/R^2$ . На расстоянии  $R_L \approx 3.16R_e$  от  $z_e$  значение  $\Delta p(z_e \pm R_L) \approx 0.1p(z_e)$ . При  $R > R_L \approx 2.5$  км почти линейная волна от метеороида становится практически сферической, т. е.  $\Delta p(R) \propto 1/R$ , в то время как на расстояниях  $R < R_L$  она близка к цилиндрической.

Считая, что ударная волна распространяется в экспоненциальной атмосфере, для расстояний  $R > R_L$  имеем соотношение для относительного избыточного давления:

$$\frac{\Delta p(R)}{p} = \frac{\Delta p(z_e \pm R_L)}{p(z_e \pm R_L)} \frac{R_L}{R} \exp\left(\frac{z - (z_e \pm R_L)}{2H}\right), \quad (30)$$

где  $\Delta p(z_e - R_L) = 220$  Па. При расчете избыточного давления на высотах  $z < z_e - R_L$  и  $z > z_e + R_L$  в выражении (30) следует выбирать знаки «минус» и «плюс» соответственно. В частности, под эпицентром взрыва, где R = 53 км, имеем  $\Delta p \approx 32.5$  Па. Значение экспоненты при этом составляет около  $3.16 \cdot 10^{-2}$ ,  $p(z_e - R_L) \approx 220$  Па. Оцененная амплитуда в 32.5 Па хорошо согла суется с данными измерений [38], где  $(\overline{\Delta p}^2)^{1/2} \approx 21...28$  Па. Результаты расчета  $\Delta p(R)$  по соотношению (30) приведены в табл. 4.

Распространение ударной волны вверх привело к возмущению верхней атмосферы. При  $R > R_I$  также справедлива формула (30).

Результаты расчета высотной зависимости  $\Delta p(z)$  для  $z \ge 50$  км с использованием соотношения (30) приведены в табл. 5. При этом учитывалась высотная зависимость H(z) и выполнялось численное интегрирование по д. Видно, что по мере увеличения высоты избыточное давление во фронте ударной волны достаточно быстро уменьшается. Относительное изменение  $\Delta p/p_0$  сначала несколько уменьшается, а при  $z \ge 80$  км увеличивается. На больших высотах  $\Delta p/p_0 > 1$ , и даже  $\Delta p/p_0 >> 1$ . Реально величина эффекта будет несколько меньше, так как при расчетах не учитывалась диссипация энергии волны, которая при  $\Delta p/p_0 > 0.2...0.3$  вызвана, прежде всего, влиянием нелинейности. При этом спектр акустического сигнала обогащается высшими гармониками, которые диссипируют на меньших высотах.

Энергия ударной волны в глубине атмосферы распространяется и в горизонтальном направлении. Этому способствуют стратосферный и термосферный волноводы. Так, при цилиндрической расходимости волны в волноводе на высоте  $z \approx 100...150$  км и  $R \approx 1000$  км  $\Delta p/p_0 \approx \approx 0.06...0.32$ .

Выше приведены лишь оценки амплитуды ударных волн. Волновые профили ударных волн могут быть получены методами газовой динамики [27].

## ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ

**Динамика ударной волны**. Метеороид, двигаясь в атмосфере, создал за собой нагретый след, который затем излучал электромагнитную энергию и расширялся до тех пор, пока давление газа в нем не сравнялось с атмосферным. При этом плотность воздуха существенно (в 10...100 раз) [18] уменьшалась. Для оценки параметров следа от метеороида учтем, что поперечная скорость ударной волны дается следующим соотношением [18]:

$$v_{st} = \frac{dR_s}{dt} = v\frac{r}{R_s}, \quad R_s(0) = r,$$

где r — радиус тела. Интегрирование этого соотношения при  $v \neq v(t)$  дает

$$R_s = r \sqrt{1 + \frac{2vt}{r}}.$$
 (31)

Поскольку характерное время движения метеороида равно  $\tau_{\rho} = H/v \sin \alpha$ ,

$$R_s(\tau_e) \approx \sqrt{\frac{2rH}{\sin \alpha}} = \sqrt{\frac{Hd}{\sin \alpha}} = \sqrt{Ld}$$
. (32)

При  $z = z_e$  значение  $d \approx 10$  м, H = 7.5 км и  $\alpha \approx 51^\circ$ ,  $L \approx 10$  км, тогда имеем  $R_s(\tau_e) \approx 316$  м. Характерное время расширения следа до  $R_s = \kappa r$ , как это следует из (31),  $r^2 = 1$ 

$$t_d = \frac{\kappa^2 - 1}{2\upsilon}r$$

При  $v \approx 30$  км/с на высоте  $z \approx z_e$ ,  $r \approx 5$  м и  $\kappa = 5$ имеем  $t_d \approx 2$  мс, что заметно меньше, чем  $\tau_e \approx 0.3$  с и  $\tau_r \approx 0.13$  с.

По мере излучения и расширения следа газ в нем охлаждается, пары взрыва конденсируются и образуется видимый след. Визуализации следа способствует также конденсация паров, возникших в результате абляции вещества космического тела. При диаметре следа  $2R_s(\tau_e) \approx 0.63$  км угловой размер следа на расстоянии  $R \approx 53$  км равен

$$\Delta \alpha = \frac{2R_s(\tau_e)}{R} \approx 0.012 \text{ pag} \approx 0.68^\circ$$

Угловой размер следа метеороида был несколько больше углового размера Солнца (около 0.5°).

Заметим, что при  $R_{\rho} \approx 0.8$  км

$$\Delta \alpha_c = \frac{2R_c}{R} \approx 0.030 \text{ рад} \approx 1.7^\circ,$$

что существенно больше углового размера Солнца.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

*Охлаждение следа.* Уравнение для температуры продуктов взрыва имеет вид

$$Cm\frac{dT}{dt} = -\sigma(T^4 - T_0^4)S(t), \ T(0) = T_m, \qquad (33)$$

где *C* и *m* — удельная теплоемкость и масса продуктов взрыва,  $S(t) \approx 2\pi r (L_e + r) \approx 2\pi r (t) L_e$ .

Для цилиндрического взрыва радиус образования  $(-2)^{1/4}$   $(-2)^{1/2}$ 

$$r(t) = \left(\frac{E_L t^2}{\rho}\right)^{0.4} = r_e \left(\frac{t}{t_0}\right)^{0.2} .$$
(34)

Здесь  $r_e = d_e/2$ ,  $d_e \approx 10$  м,  $t_0 = r_e^2 \sqrt{\rho/E_L}$ . При  $\rho \approx 4.2$  г/м<sup>3</sup>,  $E_L \approx 0.33$  ГДж/м,  $r_e \approx 5$  м имеем  $t_0 \approx 89$  мкс.

При  $m = m_e = m(z_e) = \text{const} u$ 

$$S(t) = S_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/2},$$

где  $S_0 = 2\pi r_e L_e \approx 1.2 \approx 10^5 \text{ м}^2$ , решение уравнения (33) имеет вид

$$f(\boldsymbol{\theta}) = \frac{4}{3} \left( \frac{t}{t_r} \right)^{3/2} + f(\boldsymbol{\theta}_m).$$
(35)

Здесь  $\theta = T/T_0, \, \theta_m = T_m/T_0,$ 

$$t_r = (t_\sigma t_0^{1/2})^{2/3} , \qquad (36)$$

$$f(\theta) = \operatorname{arctg} \theta + \frac{1}{2} \ln \frac{\theta + 1}{\theta - 1},$$
  
$$t_{\sigma} = \frac{Cm_e}{\sigma T_0^3 S_0}.$$
 (37)

При  $T_m = 2260$  K,  $T_0 = 260$  K имеем  $\theta_m \approx 14$ . В первые мгновения после взрывоподобного энерговыделения характерное время охлаждения за счет излучения дается соотношением:

$$t_{\sigma m} = \frac{Cm_e}{\sigma T_m^3 S_0} \,. \tag{38}$$

Очевидно, что  $t_{\sigma m} \ll t_{\sigma}$ .

Если бы охлаждение следа происходило только за счет излучения, то характерное время этого процесса было бы равно  $t_{\sigma}$ . Полагая в (37) и (38)  $C = 800 \ \text{Дж}/(\kappa \Gamma \cdot \text{K}), m_e \approx 880 \ \text{к}\Gamma, T_0 \approx 250 \ \text{K}, T_m \approx 3500 \ \text{K}, S_0 \approx 1.2 \cdot 10^5 \ \text{M}^2$ , получим, что  $t_{\sigma} \approx 6.6 \ \text{c}$ , а  $t_{\sigma m} \approx 2.4 \ \text{мc}$ . Тогда из (36) имеем  $t_r \approx 16 \ \text{с}$ . Время  $t_r$  является характерным временем охлаждения следа при совместном влиянии процессов тер-

температуры воздуха в следе								
<i>t</i> , мс	$T/T_0$	$\Delta T$ , K	Т, К					
0	14	3250	3500					
0.28	12	2750	3000					
0.59	10	2250	2500					
1.3	8	1750	2000					
2.8	6	1250	1500					
6.2	4	750	1000					
25.6	2	250	500					
47.6	1.5	175	375					
83.6	1.2	50	300					
112	1.1	25	275					
140	1.05	12.5	262.5					
342	1.01	2.5	252.5					

Таблица 6. Временные вариации

модинамического расширения с характерным временем  $t_0 \approx 89$  мкс и излучения с характерным временем  $t_{\sigma} \approx 6.6$  с. Заметим, что скорость расширения нагретого следа за счет турбулентной диффузии на порядок меньше скорости термодинамического расширения. Время последнего tc при цилиндрическом взрыве находится из соотношения (34) при  $r = R_c \approx 0.8$  км. Оно составляет около 2.7 с. За это время радиус следа за счет увеличится турбулентной диффузии на  $\Delta r = \sqrt{D_{t0}t_c} \approx 90$  M, rge  $D_{t0} \approx 3.3 \cdot 10^3 \text{ M}^2/\text{c}, t_c \approx 2.7 \text{ c}.$ 

Таким образом, наибольшая скорость охлаждения нагретого следа за счет термодинамического расширения и излучения имела место в интервале времени 0...30 мс. За это время θ уменьшается на порядок.

Результаты расчета временных зависимостей  $T/T_0$  и  $\Delta T$  по соотношению (35) приведены в табл. 6. Видно, что время релаксации температуры в следе метеороида не превышает 0.2...0.3 с. Скорость релаксации Т на последних стадиях описывается следующим уравнением:

$$\frac{dT}{dt} \approx -\frac{8\sigma T_0^4}{C\rho_p r_m} (\theta - 1), \qquad (39)$$

решение которого имеет вид

$$\theta = 1 + (\theta_1 - 1) e^{-(t - t_1)/t_{T_{\sigma}}},$$
$$\theta_1 = \theta(t_1),$$

$$t_{T\sigma} = \frac{C\rho_p r_m}{8\sigma T_0^3},$$

где  $\rho_{p}$  — плотность продуктов взрыва в следе после расширения, максимальное значение радиуса  $r_m$ находится из выражения (34) при t = 0.2...0.3 с. Например, при t = 0.25 с имеем  $r_m \approx 265$  м, а  $dT/dt \approx$  $\approx$  −0.2 К/с. Здесь учтено, что  $\theta$  − 1  $\approx$  0.01, а  $\rho_n \approx$  $\approx \rho T_0/T \approx 5 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>. Характерное время  $t_{\gamma\sigma} \approx 15^{\circ}$  с.

Заметим, что скорость релаксации температуры существенно зависит от высоты, а значит и от теплоемкости вещества в следе, а также от поперечного масштаба следа r<sub>m</sub>. Так, для Челябинского метеороида ( $z_{\rho} \approx 23$  км) имеем соотношение для dT/dt, подобное выражению (39):

$$\frac{dT}{dt} \approx -\frac{16\sigma T_0^4}{C\rho_p H} (\theta - 1) \, \cdot$$

Например, при  $\Delta t = 10$  ч,  $\theta - 1 \approx 0.1$ ,  $\rho_p \approx \rho_0 \approx$  $\approx 0.1$  кг/м<sup>3</sup>,  $H \approx 7.5$  км и  $T_0 \approx 210$  К имеем  $dT/dt \approx$  $\approx -2.7 \cdot 110^{-4}$  K/c. При  $\Delta t = 1$  ч получим, что  $\Delta T \approx$ ≈ 1 К. Таким образом, охлаждение следа от Челябинского метеороида на последних стадиях протекало очень медленно. По этой причине даже спустя 9 ч после взрыва, как показали измерения на японском метеорологическом ИСЗ MTSAT-2, превышение температуры в следе над фоном составляло около 70 К, или 33 %. За это время нагретая область под действием ветра переместилась в горизонтальном направлении на расстояние 32...96 км при скорости ветра w == 10...30 м/с.

Еще меньшей была скорость охлаждения следа при взрыве Тунгусского космического тела. При этом  $dT/dt \approx 3 \cdot 10^{-5}$  K/c. За сутки температура воздуха в следе уменьшилась примерно на 3 K, а за десять суток — на 30 K. За десять суток нагретая область могла переместиться на расстояние порядка 10 тыс. км. Приведенные выше оценки dT/dt для Челябинского и Тунгусского метеороидов справедливы без учета всплывания нагретого следа. Реально следовало ожидать подъёма нагретого следа примерно на 10...20 км. При этом значения |dT/dt| увеличатся соответственно в 3.8...14.4 раза.

#### ЭФФЕКТ МЕТЕОРОИДНОГО ПЛЮМА

В результате пролета метеороида под действием ударной волны в атмосфере образуется нагретый примерно до 3500 К след, по форме близкий к цилиндру. Его радиус в соответствии с выражением (32) дается следующим соотношением:

$$R_s(\tau_e) \approx \sqrt{Ld} = \sqrt{Hd / \sin \alpha}$$
.

Нагретый до высоких температур воздух вместе с испарившимся веществом метеороида, расширяясь, устремляется вдоль следа и вверх. Так возникает эффект всплывания вещества, получивший название эффекта плюма.

Задача о движении плюма строго может быть решена численными методами трехмерной гидродинамики. Однако из-за существенного различия продольных (десятки километров) и поперечных (сотни метров) размеров следа численное решение этой задачи при помощи современных компьютеров сильно затруднено из-за необходимости применять достаточно малые размеры расчетной ячейки. Примеры гидродинамических расчетов для крупных ячеек приведены в работах [2, 18].

Далее описываются простые аналитические модели, позволяющие оценить основные параметры плюма. Для этого трехмерное движение плюма рассматривается отдельно как одномерное движение вдоль следа и как одномерное движение вверх. Основанием для такого подхода служит то, что скорости и времена движения вдоль следа и вверх, как будет показано далее, отличаются на порядок.

*Движение плюма вдоль следа*. Уравнение движения имеет вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho_p} \frac{dp}{dl} - g\sin\alpha \,,$$

где *u* — скорость движения плюма с объемной плотностью  $\rho_p = \rho_0 T_0 / T \equiv \rho_0 / \beta_T$ ,  $\rho_0$  и  $T_0$  — невозмущенные значения плотности и температуры воздуха,  $\beta_T = T/T_0$ ,  $dl = dz/\sin \alpha$ . При адиабатическом расширении газа

$$\frac{dp}{dz} = \gamma p \left(\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz}\right) = -\gamma \frac{p}{H}$$

Тогда уравнение движения сводится к такому:

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

$$\frac{du}{dt} = (\beta_T \gamma e^{-x} - 1)g\sin\alpha , \qquad (40)$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $x = (z - z_e)/H$ . Поскольку

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{dl}\frac{dl}{dt} = u\frac{du}{dl} = u\frac{du}{dz}\sin\alpha ,$$

соотношение (40) принимает вид:

$$u\frac{du}{dx} = gH(\gamma\beta_T e^{-x} - 1).$$
(41)

Решение (41) может быть представлено так:

$$u = u_L(\tilde{\beta}(1 - e^{-x}) - x)^{1/2}, \ \tilde{\beta} = \gamma \beta_T, \qquad (42)$$

$$u_L = \sqrt{2gH} \ . \tag{43}$$

При  $H \approx 7.5$  км из (43) имеем для характерной скорости  $u_I \approx 383$  м/с.

Из соотношения (42) следует, что u(x) = 0 при  $x = x_{\text{max}}$  т. е. при

$$\tilde{\beta}(1-e^{-x_{\max}})-x_{\max}=0.$$

При  $x_{\text{max}} >> 1$  имеем  $x_{\text{max}} \approx \beta$ .

Функция u(x) принимает максимальное значение  $u_m$  при  $x_m = \ln \tilde{\beta}$ , которое дается следующим выражением:

$$u_m = u_L (\tilde{\beta} - 1 - \ln \tilde{\beta})^{1/2} . \qquad (44)$$

При  $\tilde{\beta} >> 1$ ,  $\tilde{\beta} >> \ln \tilde{\beta}$  из (44) имеем  $u_m \approx u_L \tilde{\beta}^{1/2}$ . Для Румынского метеороида при  $\beta_T = \theta_m = 14$ ,  $\gamma \approx 1.2$  имеем  $\tilde{\beta} \approx 16.8$ ,  $u_m \approx 1.6$  км/с,  $x_m \approx 2.8$ , a  $x_{max} \approx 16.8$ .

Время достижения  $u_m$ , как следует из уравнения (40), оценивается как  $t_m \approx u_m / \tilde{\beta}g \approx 9.7$  с. За это время плюм переместится на расстояние  $\Delta l = \overline{u}(x)t_m$ , где  $\overline{u} \approx 0.5u_m \approx 0.6$  км/с, т. е. примерно на 7.8 км. При этом высота плюма увеличится на  $\Delta z = \Delta l \sin \alpha \approx 6$  км.

Далее оценим максимальную высоту подъема плюма из условия, что время его движения  $\Delta t_u$ равно времени жизни следа  $\Delta t_D$ . Последнее определяется диффузионными процессами, замывающими след. Учитывая, что

$$\Delta t_{u \max} = \frac{\Delta l_{\max}}{\overline{u}} ,$$
$$\Delta t_{D} = \frac{\left(2R_{s}\right)^{2}}{D_{t}} ,$$

$$\overline{u} = \frac{1}{x_{\max 0}} \int_{0}^{x_{\max 0}} u(x) dx ,$$

получим

$$\Delta z_{\max} = \Delta l_{\max} \sin \alpha = \frac{4R_{s0}^2 \overline{u}}{D_t} \sin \alpha . \quad (45)$$

Здесь  $\overline{u}$  — среднее значение скорости в диапазоне высот от  $z_e$  до  $z_m = z_e + \Delta z_{max}$ , т. е. от x = 0 до  $x = x_{max0} = \Delta z_{max}/H$ ,  $R_{s0}^2 = Ld \approx Ld_0$ ,  $D_t$  — коэффициент турбулентной диффузии.

Полагая для оценки  $R_{s0}^2 \approx 10^4 \text{ M}^2$ ,  $\overline{u} \approx 800 \text{ м/c}$ ,  $D_t \approx 3000 \text{ M}^2 \text{c}^{-1}$ , из соотношения (45) получим, что  $\Delta z_{\text{max}} \approx 8.3 \text{ км}$ ,  $z_m \approx 51 \text{ км}$ , а время подъема на эту высоту  $\Delta t_{\text{max}} = \Delta z_{\text{max}} / (\overline{u} \sin \alpha) \approx 13.3 \text{ c}$ . Заметим, что высота  $z_m$  не может превышать высоту, где интенсивность ударной волны становится существенной. Важно также то, что u(x) больше скорости звука. Это означает, что движущийся плюм способен генерировать вторичную баллистическую волну. Эта волна, достигая E- и F1-слоев ионосферы (высоты 100...150 км), может производить регистрируемые возмущения в верхней атмосфере и ионосфере. Более подробное описание этих эффектов выходит за рамки настоящей работы.

Движение плюма по вертикали. Сначала оценим кинематические параметры плюма. Известно, что метеорная пыль (аэрозоли) всегда есть на высотах 40...50 км. Скорость ее производства составляет около 10 кт/год [34]. Например, при взрыве Челябинского космического тела в стратосферу было выброшено несколько килотонн аэрозолей. При взрыве Румынского метеороида масса пыли не превышала массу тела на высоте взрыва, т. е. 880 кг (см. табл. 1). Пыль вместе с нагретым до температуры в 3500 К газом быстро расширились в направлении, перпендикулярном к направлению движения. В результате этого возникло горячее образование, часто именуемое термиком, длиной  $L_{\rho}$  и радиусом r, которое за счет силы Архимеда  $F_A$  со значительным начальным ускорением  $a_n$  в результате конвекции стало быстро подниматься вверх. По мере подъема образование увеличивалось в объеме, остывало за счет излучения, расширения и турбулентного перемешивания. Постепенно плотность остывающего вещества приближалась к плотности холодного воздуха, сила Архимеда значительно уменьшалась и подъем образования практически прекратился.

Нагретое образование в первом приближении можно аппроксимировать цилиндром с длиной  $L_e \approx 3.9$  км и радиусом, который во времени изменялся согласно соотношению (34) от  $r_e \approx 5$  м до  $r_m \approx 265$  м.

Уравнение движения газа и пыли массой *m* в вертикальном направлении имеет вид

$$m\frac{dv}{dt} = F_A - mg - \frac{C_d}{2}\rho v^2 S , \qquad (46)$$

где  $m = \rho_p V$ ,  $\rho_p - плотность$  вещества в плюме объемом V,  $F_A = \rho Vg$  — сила Архимеда, g — ускорение свободного падения,  $C_d \approx 1$  — коэффициент аэродинамического сопротивления,  $\rho$  — невозмущенная плотность воздуха,  $S = 2r L_e$  — площадь сечения цилиндра радиусом r и длиной  $L_e$ . Предполагая, что масса пыли и газа в процессе всплывания и расширения остается неизменной, получим, что  $V(t) = V_0 \tau$ ,  $S(t) = S_0 \tau^{1/2}$ , где согласно (34)  $r(t) = r_e \tau^{1/2}$ ,  $V_0 = \pi r_e^2 L_e$ ,  $S_0 = 2r_e L_e$  и  $\tau = t/t_0$ . Из соотношения (46) при r = r(t) и  $\rho_p(t)$ имеем

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1\right)g - \frac{C_d}{\pi}\frac{\rho}{\rho_p}\frac{v^2}{r_s}.$$
(47)

Преобразуя (47) с учетом зависимостей  $\rho_p(t)$  и r(t), получим

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\rho}{\rho_e}\tau - 1\right)g - \frac{C_d}{\pi}\frac{\rho}{\rho_e}\tau^{1/2}\frac{v^2}{r_e}.$$
 (48)

Здесь  $\rho_p(t) = \rho_e V_0 / V(t) = \rho_e / \tau$ . Введем  $\alpha = \rho / \rho_e \approx 1.4$ ,  $\beta = C_d \alpha / \pi g r_e \approx 0.009 \text{ c}^2 / \text{м}^2$ . При этом учтено, что  $\rho = 4.2 \text{ г/м}^3$ , а  $\rho_e = 2.9 \text{ г/м}^3$  при массе пыли  $m_a \approx 880 \text{ кг}$ и объеме  $V_0 \approx 3 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ . Тогда уравнение (48) примет вид  $d\tau$ 

$$\frac{dv}{d\tau} = v_0 (\alpha \tau - 1 - \beta v^2 \tau^{1/2}), \qquad (49)$$

где  $v_0 = gt_0 \approx 8.7 \cdot 10^{-4}$  м/с.

Из соотношений (48) и (49) следует, что ускоренное движение нагретого объема воздуха (термика) начинается при  $\rho \tau / \rho_e > 1$  или  $\alpha \tau > 1$ , т. е. при t > 64 мкс. В первые 13 мс, т. е. при  $\alpha \tau - 1 >>$ >>  $\beta v^2 \tau^{1/2}$ , его движения сила сопротивления воздуха незначительна, ускорение и скорость подъема продуктов взрыва быстро увеличиваются и описываются следующими соотношениями:

$$a_{p}(\tau) = g(\alpha\tau - 1),$$
  
$$v(\tau) = v_{0}\left(\frac{\tau^{2}}{2} - \tau\right).$$

Решение (49) для всего интервала времени (от 27 мкс до 250 мс) показывает, что при  $\tau = \tau_{max}$ ускорение достигает своего максимального значения  $a_p(\tau_{max}) = a_{pmax}$ . При 13 мс < t < 17 мс значение  $\alpha_p(\tau) \approx \alpha_{pmax}$ . Значение  $\tau_{max}$  с погрешностью около 10 % оценивается из следующего соотношения:

$$\tau_{\max} = \left(\frac{\alpha}{\beta v_{\infty e} a_{p \max} t_0}\right)^2 = \left(\frac{v_{ch}^2}{v_{\infty e} a_{p \max} t_0}\right)^2,$$

где  $v_{ch} = (\pi g r_e / C_d)^{1/2} \approx 12.4$  м/с. Оценку  $a_{pmax}$  с погрешностью около 5 % можно получить, исходя из выражения

$$a_{p\max} = \sqrt[3]{\frac{2}{3} \left(\frac{\alpha v_{ch}^2}{v_{\infty e} t_0}\right)^2 g} .$$

Здесь $v_{\infty e} = v_{\infty e} = \sqrt{\pi g r_m} \approx 90$  м/с. Тогда $a_{pmax} \approx 1500$  м/с<sup>2</sup>, а  $\tau_{max} \approx 168$ ,  $t_{max} \approx 15$  мс. При этомдля  $v(\tau \tau)$  справедливо следующее приближенное соотношение:

$$v(\tau) = \left(\frac{\alpha \tau - a_{p\max} / g}{\beta \tau^{1/2}}\right)^{1/2}$$

При t > 17 мс и вплоть до 250 мс, т. е. при  $\tau = 555...6900$ , ускорение  $a_p(t)$  быстро уменьшается. Для этого интервала времени

$$v(\tau) = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \tau^{1/4} = v_{\rm ch}^{1/4}$$

При  $t \ge 250$  мс подъемная сила практически уравновешивается силой сопротивления, а скорость подъема продуктов взрыва достигает своего максимального значения, равного, как это следует из (47),

$$v_{\infty} = \left[\frac{\pi}{C_d} \left(1 - \frac{\rho_p(r_m)}{\rho}\right) gr_m\right]^{1/2}, \qquad (50)$$

где  $r_m$  дается соотношением (34). При  $C_d \approx 1$  и  $\rho_p(r_m) / \rho << 1$  из (50) имеем

$$v_{\infty} = \sqrt{\pi g r_m}$$

Добавим, что за время t = 250 мс продукты взрыва поднялись на высоту около 10 м, что намного

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

меньше, чем  $r_m \approx 330$  м. При этом  $v_{\infty}(z_e) \approx 90$  м/с. Характерное время достижения скорости  $v_{\infty}$  рав-

но  $t_{\rm ch} = v_{\infty} / a_{p\rm max} \approx 60$  мс. При

$$p(z) = p(z_e)e^{-(z-z_e)/H}$$
, (51)

с учетом соотношения (34) получим, что

$$r_m(z) = r_m(z_e) e^{(z-z_e)/2H}$$
. (52)

Тогда

$$v_{\infty}(z) = v_{\infty_e} \mathrm{e}^{(z-z_e)/4H}, \qquad (53)$$

где  $v_{\infty_e} = v_{\infty}(z_e)$ .

**Дополнительное ускорение плюма**. После достижения скорости  $v_{\infty}$  ускорение продуктов взрыва стремится к нулю. Продукты взрыва продолжают подниматься вверх. Постепенно движение снова становится ускоренным. Появление растущего с увеличением высоты ускорения  $a_p(z)$  обусловлено уменьшением давления воздуха, приводящего к увеличению  $r_m(z)$  и  $v_{\infty}(z)$  (см. соотношения (52) и (53)). При этом

$$a_p(z) = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz}.$$
 (54)

С учетом соотношения (53) из (54) имеем

$$a_p(z) = \frac{v_{\infty e}^2}{4H} e^{(z-z_e)/2H} = a_{p0} e^{(z-z_e)/2H} , \quad (55)$$

где  $a_{p0} = v_{_{\infty e}}^2 / 4H \approx 0.27 \text{ м/c}^2$  при  $v_{_{\infty e}} \approx 90$  м/с и H = 7.5 км.

Результаты оценки ускорения  $a_p$ , вызванного уменьшением давления воздуха, при H = 7.5 км и  $v_{\infty e} \approx 90$  м/с по соотношению (55) приведены в табл. 7. Видно, что при увеличении высоты продуктов взрыва даже на 10 км ускорением продуктов взрыва можно пренебречь и считать движение практически равномерным.

Увеличение скорости  $v_{\infty}$  эквивалентно движению с ускорением  $a_p$ , которое увеличивалось с увеличением высоты примерно от 27 до 53 см/с<sup>2</sup>.

Таблица 7. Зависимость ускорения продуктов взрыва от их высоты подъема

Δ <i>z</i> , км	$a_p,  cm/c^2$	Δ <i>z</i> , км	$a_p,  { m cm/c^2}$
0.1	27	5	38
1	29	10	53
2	31		

Характерное время увеличения скорости  $t_{\rm ch} = v_{\infty e}/a_{p0} \approx 333$  с, что превышает время жизни плюма, равного 36...108 с (см. ниже).

Высота подъема плюма. За время расширения продуктов взрыва они сместились по высоте примерно на 40 м. При дальнейшем подъеме продуктов взрыва необходимо учитывать зависимость  $v_{\infty}(z)$  согласно соотношению (53). При этом

$$\frac{d\Delta z}{dt} = v_{\infty e} e^{\Delta z/4H} , \quad \Delta z(0) = 0 \text{ KM}, \quad (56)$$

где  $\Delta z = z - z_e$ . Решение (56) имеет вид

$$\Delta z(t) = -4H \ln\left(1 - \frac{v_{\infty e}t}{4H}\right).$$
 (57)

При  $v_{\infty e}t \ll 4H$ , т. е. при t < 50...60 с, из (57) получаем, что

$$\Delta z(t) \approx v_{\infty e} t . \tag{58}$$

Как следует из выражения (58), смещение области нагретых продуктов взрыва  $\Delta z$  увеличивается пропорционально времени подъема t, т. е. движение плюма является практически равномерным. Максимальное время подъема плюма определяется временем его жизни  $\tau_D$ . Плюм ис-

Таблица 8. Зависимость смещения области нагретых продуктов взрыва от времени подъема

$\Delta t, c$	Δ <i>z</i> , км	$\Delta t, c$	Δ <i>z</i> , км
1	0.09	20	1.9
2	0.18	30	2.8
3	0.27	50	4.9
5	0.45	75	7.6
10	0.9	100	10.7

Таблица 9. Зависимость скорости и времени оседания аэрозолей от их радиуса

<i>r<sub>p</sub></i> , мкм	<i>v<sub>p</sub></i> , м/с	τ <sub>p</sub> , c	$\tau_p, cyt$
1	$4.6 \cdot 10^{-4}$	9.8 · 10 <sup>7</sup>	1135
2	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{7}$	284
5	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{6}$	44
10	$4.6 \cdot 10^{-2}$	9.8 · 10 <sup>5</sup>	11.3
20	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{5}$	2.8
50	1.2	$3.7 \cdot 10^{4}$	0.44
100	4.6	$9.8 \cdot 10^3$	0.13

чезает под действием турбулентной диффузии. Тогда  $\tau_D = r_m^2 / D_{t0}$ . При  $r_m \approx 265$  м,  $D_{t0} \approx 3000 \text{ m}^2 \cdot \text{c}^{-1}$ имеем  $\tau_D \approx 23.4$  с, а увеличение высоты плюма согласно (57)  $\Delta z_{\text{max}} \approx 2.2$  км. Если же  $D_{t0} \approx 1000 \text{ m}^2 \cdot \text{c}^{-1}$ , то  $\tau_D \approx 70$  с и  $\Delta z_{\text{max}} \approx 7.1$  км. Результаты расчета  $\Delta z$ по соотношению (57) приведены в табл. 8.

Оседание аэрозолей. В процессе абляции, а затем и взрыва космического тела возникли его фрагменты с радиусом  $r_p$  от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  м и массой  $m_p$  от  $10^{-12}$  до 1 г. Относительно тяжелые фрагменты космического тела (с массой порядка 1 г) могли выпасть на поверхность Земли в виде метеоритов. Наиболее легкие пылинки (аэрозоли), напротив, поднялись вверх на 10 км, т. е. до высоты  $z_n \approx 52$  км, вместе с горячими продуктами взрыва. В дальнейшем аэрозоли принимали участие в трех процессах. Во-первых, в медленном оседании на поверхность Земли. Во-вторых, в турбулентном перемешивании с окружающим воздухом. В-третьих, в переносе преобладающими ветрами вокруг Земли, осуществляя полный оборот примерно за двое суток.

Скорость оседания аэрозолей дается известным соотношением [22]:

$$v_p = \frac{2\rho_a g}{9\eta} r_p^2,$$

где  $\rho_a \approx 3.3 \text{ т/m}^3$  — объемная плотность аэрозоля,  $g \approx 9.8 \text{ м/c}^2$ ,  $\eta = 1.7 \cdot 10^{-5} \Pi \text{a} \cdot \text{c}$  — коэффициент динамической вязкости атмосферного газа. Время оседания аэрозолей  $\tau_p = z_p / v_p$ . Результаты оценок  $v_p$  и  $\tau_p$  для  $z_p = 45$  км приведены в табл. 9. Из табл. 9 следует, что аэрозоли радиусом 1 мкм могут находиться в атмосфере более двух лет. Этого, однако, не происходит. За счет турбулентного перемешивания с окружающим газом эти аэрозоли исчезают за время

$$\tau_{pt} = \frac{z_p^2}{D_{t0}},$$

где  $D_{t0}$  — коэффициент турбулентной диффузии. Полагая  $z_p = 52$  км,  $D_{t0} = 1000...3000 \text{ м}^2/\text{с}$ , получим, что  $\tau_{pt} \approx 11...32$  сут. Если же  $z_p \approx 46$  км, то  $\tau_{pt} \approx 8.6...25$  сут.

Сравнение с результатами наблюдений. Приборные наблюдения за газопылевым облаком, возникшим после падения Румынского метеороида, не проводились. Поэтому полученные расчетные значения  $\Delta z(t)$  целесообразно срав-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

нить с экспериментальными данными  $\Delta z_{exp}$  для Челябинского метеороида, который вторгся в атмосферу Земли в 03:20:22 15 февраля 2013 г. (табл. 10). Результаты наблюдений аэрозольного следа описаны в работах [2, 10—12, 31]. Видно, что значения  $\Delta z$  и  $\Delta z_{exp}$  близки между собой. Близки также расчетные  $v_{\infty}$  и экспериментальные  $v_{exp}$  значения скорости (см. табл. 10).

За время  $t \approx 60$  с продукты взрыва поднимались на высоту около 34 км. При t > 60 с становится существенной турбулентная диффузия. Действительно, за счет турбулентного перемешивания диаметр цилиндрического образования увеличивается на величину  $L_t = \sqrt{D_t t}$ . При значении коэффициента турбулентной диффузии  $D_t = 1000...3000 \text{ м}^2/\text{с}$  и t = 60 с имеем  $L_t \approx 245...425$  м. При значении радиуса облака r<sub>m</sub> ≈ 1050 км объем продуктов взрыва на высоте 34 км увеличивался примерно в 6.6...8.5 раз, примерно на порядок уменьшилась величина нагрева продуктов взрыва, а их плотность приблизилась к плотности окружающего воздуха, т. е.  $\rho_p \to \rho.$  При этом подъемная сила  $F = (\rho - \rho_e) \dot{V}g$  обратилась в нуль, подъем продуктов взрыва прекратился, что и наблюдалось авторами работы [31].

Далее сравним результаты расчетов и наблюдения эффекта оседания метеорной пыли.

В работах [10—12, 31] описаны результаты лидарного зондирования атмосферы над г. Москва и г. Обнинск Калужской обл. В ночь с 21 на 22 февраля 2013 года над г. Москва обнаружен пик рассеянного аэрозолями сигнала лидара, пришедшего с высоты 35 км. Примерно за 7 сут облако аэрозолей, двигаясь под действием западного ветра, прошло расстояние около 21 тыс. км. При этом скорость западного ветра в стратосфере составляла около 35 м/с, что хорошо согласуется с результатами метеорологических наблюдений. Сигнал наблюдался в течение всего времени зондирования (с 15:49 UT 21 февраля до 23:50 UT 22 февраля). За 8 ч наблюдений слой опустился с 34.9 до 34.2 км. Такому опусканию соответствует вертикальная скорость  $v_p \approx 2.4$  см/с и радиус аэрозолей  $r_p \approx 8$  мкм.

Аэрозольные следы в атмосфере над Москвой наблюдались также 25, 26 февраля и 5 марта 2013 г. [10–12, 31].

Наблюдения показали, что после достижения максимальной высоты подъема (35 км) в течение первых 100 с аэрозольный след стал опускаться. За последующие 400 с его высота уменышилась на 4 км (см. [11], рис. 3). Скорость опускания была близка к 10 м/с. С такой скоростью оседают частицы радиусом около 150 мкм.

Лидарные измерения стратосферного аэрозоля над Обнинском проведены в ночное время с 18 февраля до 11 марта 2013 г. [1]. Первый относительно слабый сигнал отмечен 18 февраля 2013 г. Сигнал приходил с высоты 42 км. После 20 февраля отражающие слои наблюдались в диапазоне высот от 34 до 38 км. Слои отсутствовали 22 и 23 февраля. Толщина слоев составляла несколько сот метров. Полученное на станции Обнинск отношение коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 355 и 532 нм позволило оценить размер аэрозолей [1]. Оказалось, что их диаметр был порядка 1 мкм. По расчетам время жизни таких аэрозолей составляло 5...14 сут при *z<sub>p</sub>* ≈ 35 км и 7...20 сут при *z<sub>p</sub>* ≈ 42 км. Действительно, время турбулентного перемешивания, а значит и время жизни аэрозолей с разме-

*Таблица 10.* Зависимость параметров атмосферы и нагретого объема газа от высоты при взрыве Челябинского метеороида

<i>Z</i> , KM	<i>р</i> , кПа	<i>t</i> , c	Δ <i>z</i> , км	$\Delta z_{\rm exp}$ , км	<i>r<sub>m</sub></i> , м	<i>v</i> <sub>∞</sub> , м/с	<i>v</i> <sub>exp</sub> , м/с
23	4.7	0	0	0	510	125	_
24.2	4	10	1.3	1.2	550	130	130
25.3	3.4	18	2.3	2.3	600	136	140
33.4	1.16	55	7.8 (9.5)	10.4	1030 (1430)	178 (210)	210

В скобках приведены значения параметров с учетом увеличения объема продуктов взрыва в результате турбулентной диффузии.

ром 1...10 мкм, равно  $t_t = z_p^2 / D_{t0}$ . При  $D_{t0} = 1000...3000 \text{ м}^2 \text{c}^{-1}$ , а также  $z_p = 35 \text{ и} 42 \text{ км}$ , имеем 5...14 или 7...20 сут соответственно. Это хорошо согласуется с результатами наблюдений на станции Москва: рассеянный сигнал отмечался 5 марта, т. е. через 20 сут после пролета Челябинского метеороида [10—12, 31].

Таким образом, предложенная модель подъема, стабилизации и разрушения газопылевого плюма, вызванного взрывом Румынского метеороида, позволила качественно и количественно объяснить основные наблюдаемые факты: рост скорости всплывания при увеличении высоты облака, продолжительность всплывания, максимальную высоту подъема газопылевого образования, оседание аэрозолей и их движение вокруг Земного шара. Пылинки с размером порядка 100 мкм опускались со скоростью около 10 м/с.

Установлена немонотонная зависимость ускорения движения плюма от высоты, обусловленная действием двух факторов. Первый из них связан с быстрым (на расстоянии около 25 м от места взрыва) увеличением скорости всплывания от 0 до 100 м/с за счет значительного (до 1500 м/с<sup>2</sup>) ускорения, что привело к быстрому увеличению силы сопротивления окружающего воздуха и уменьшению ускорения практически до нуля. Второй фактор, обеспечивший медленный рост ускорения от 27 до 53 м/с<sup>2</sup>, обусловлен уменьшением давления воздуха, а значит, и уменьшением силы сопротивления движению по мере увеличения высоты подъема газопылевого облака.

Незначительное увеличение скорости всплывания от 101 до 104 м/с также объясняется уменьшением давления воздуха и силы сопротивления.

После подъема плюма примерно на 8 км от места взрыва наступила стабилизация его подъема. Причиной этого было охлаждение облака из-за турбулентного перемешивания с холодным воздухом. Этот фактор способствовал тому, что значение подъемной силы на высоте около 50 км обратилось практически в нуль.

После окончания всплывания плюм принял участие в трех процессах: в оседании пылинок на поверхность Земли, в дальнейшем турбулентном перемешивании с окружающим воздухом и в движении пылинок под действием ветра почти в горизонтальном направлении. Из-за турбулентного перемешивания даже самые мелкие (1...10 мкм) аэрозоли существовали в атмосфере около 10...30 сут. За это время остатки газопылевого облака несколько раз обогнули земной шар. Пылинки с размером порядка 100 мкм опускались со скоростью 10 м/с.

Согласие результатов моделирования и наблюдений для Челябинского метеороида свидетельствуют об адекватности предложений в данной работе модели газопылевого плюма. Следовательно, эта модель хорошо описывает и плюм, возникший при взрыве Румынского метеороида.

# выводы

Проведен комплексный анализ основных процессов в системе Земля — атмосфера — ионосфера магнитосфера, сопровождавших падение Румынского метеороида, и установлено следующее.

1. Начальная кинетическая энергия метеороида была близка к 1.66 ТДж, или 0.4 кт ТНТ. В энергию световой вспышки трансформировалось около 8 % начальной кинетической энергии космического тела.

2. Высота взрыва румынского тела была близка к 43 км, а длина области взрыва — около 3.3 км. Вблизи этой высоты скорость метеороида уменьшилась примерно на 35 %, масса — почти в три раза.

3. Избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра взрыва составило 20...30 Па. Этого оказалось недостаточно для того, чтобы вызвать разрушения элементов конструкций сооружений.

4. Относительные возмущения давления воздуха на ионосферных высотах над эпицентром взрыва достигали десятков и даже сотен процентов.

5. Энергия и мощность взрывоподобного процесса были близки к 1.3 ТДж и 10 ТВт.

6. Энергия и мощность световой вспышки составила около 0.136 ТДж и 1.6 ТВт соответственно. Энергия вспышки на 6–7 порядков была меньше энергии, при которой возникает воспламенение веществ и пожары.

7. Нагретый примерно до 3500 К след от метеороида остывал главным образом за счет излучения, а также в результате расширения и турбулентного перемешивания с холодным воздухом. В течение десятых долей секунды увеличение температуры следа составляло всего несколько кельвин.

8. После пролета и взрыва метеороида возник нагретый и разреженный след, вдоль которого перемещался плюм. Предложены две упрощенные одномерные модели движения плюма вдоль следа и в вертикальном направлении. Высота подъема плюма в обеих моделях была около 10 км.

Найдены временные и высотные зависимости скорости, ускорения и высоты подъема газопылевого облака, вызванного конвекцией нагретых продуктов взрыва. Оценены скорость, ускорение и высота вертикального подъема плюма.

10. Показано, что ускорение плюма в течение 15 мс увеличивалось от 0 до максимального значения  $1500 \text{ м/c}^2$ .

В течение последующих 250 мс ускорение уменьшилось до нуля. Далее имело место движение облака вверх, близкое к равномерному. В интервале времени от 23 до 70 с, прошедшего после взрыва, ускорение незначительно увеличивалось из-за уменьшения давления. Скорость подъема при этом заметно не увеличивалась. По данным модельных расчетов эта скорость составляла около 90 м/с.

11. Движение вверх газопылевого плюма постепенно прекратилось из-за его остывания и турбулентного перемешивания с холодным воздухом. По расчетам, в зависимости от величины коэффициента турбулентной диффузии максимальная высота подъема плюма, достигнутая в конце 23...70 с после начала подъема, составляла 2.2...7.1 км.

12. После завершения всплывания газопылевое облако принимало участие в трех процессах: медленном оседании на поверхность Земли, в турбулентном перемешивании с окружающим воздухом и в переносе ветрами вокруг планеты.

13. Показано, что в отсутствие турбулентного перемешивания время жизни микрометровых пылинок составляло бы около трех лет. Реально же их время оседания ограничивалось турбулентным перемешиванием и составляло в зависимости от размера не более 10...30 сут.

## ЛИТЕРАТУРА

- Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П. и др. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. М.: ФГБУ «ИПГ», 2013. 37 с.
- Артемьева Н. А., Шувалов В. В. Атмосферный шлейф Челябинского метеороида // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сб. науч. тр. ИДГ РАН. Спец. вып. — М.: ГЕОС. — 2014. — С. 134— 146.
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010. — 384 с.
- Астрономический вестник (тем. вып.). 2013. 47, № 4.
- 5. *Бронштэн В. А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
- 6. *Бронштэн В. А.* Вход в атмосферу крупных метеороидов // Астрон. вестник. — 1993. — 27, № 1. — С. 102— 121.
- 7. *Бронштэн В. А.* О физическом механизме квазинепрерывного дробления крупных метеорных тел // Астрон. вестник. 1993. 27, № 3. С. 65—74.
- 8. *Бронштэн В. А.* Применение теории Григоряна к расчету дробления гигантских метеороидов // Астрон. вестник. 1994. **28**. № 2. С. 118—124.
- 9. *Бронштэн В. А.* Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере // Астрон. вестник. 1995. **29**, № 5. С. 450—459.
- Горькавый Н. Н., Лихарев Д. С, Миннибаев Д. Н. Цветовые вариации аэрозольного следа Челябинского болида // Метеорит Челябинск год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф. / [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С.118—123.
- Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А. Взаимодействие Челябинского болида с атмосферой // Метеорит Челябинск год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф. [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 124—129.
- 12. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А., Проворникова Е. А., и др. Аэрозольный шлейф Челябинского болида // Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф. [редкол.: Н. А. Антипин и др. ; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014. — С. 130– 135.
- Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М.: Мир. 1978. — 532 с.
- Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. — 1979. — 17, № 6. — С. 875—893.
- 15. Грицевич М. И., Стулов В. П., Турчак Л. И. Классификация последствий ударов природных космических

тел о землю // Докл. Акад. наук. — 2009. — **429**, № 1. — С. 45—49.

- 16. Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: Сб. науч. тр. ИДГ РАН. Спец. вып. М.: ГЕОС. 2014. 160 с.
- 17. *Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др.* Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года // Астрон. вестник. — 2013. — **47**, № 4. — С. 262—277.
- Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. — 310 с.
- 19. *Кручиненко В. Г.* Математико-фізичний аналіз метеорного явища. — Киев.: Наук. думка, 2012. — 294 с.
- Метеорит Челябинск год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф./ [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014. — 694 с.
- 21. *Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И*. Аэродинамика болидов. — М.: Наука, Физматлит, 1995. — 240 с.
- 22. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
- Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доп. Нац. акад. наук України. — 2013. — № 10. — С. 97—104.
- Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // Инж. физ. — 2013. — 8. — С. 23—40.
- 25. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования // Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф. / [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014. — С. 229—264.
- Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г. // Кинематика и физика небес. тел. — 2017. — 33, № 6. — С. 34—54.
- 27. Шувалов А. В., Артемьева Н. А., Попова А. П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: Сб. науч. тр. ИДГ РАН. — М.: ГЕОС, 2014. — С. 48—59.
- Borovička J., Spurný P., Grigore V. I., Svoreň J. The January 7, 2015, superbolide over Romania and structural diversity of meter-sized asteroids // Planet. and Space Sci. — 2017. — 143. — P. 147—158.
- Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage // Probl. Atomic Sci. and Technology. - 2013. - 86, N 4. -P. 136-139.
- Gehrels T. (Ed.). Hazards due to comets and asteroids. Tucson; London: Univ. Arizona Press, 1994. – 1300 p.

- Gorkavyi N. N., Taidakova T. A., Provornikova E. A. Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide // Solar System Res.— 2013. – 47, N 4. – P. 275–279.
- Grigoryan S. S. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion // Solar System Res. – 2013. – 47, N 4. – P. 268–274.
- Hills J.G., Goda M.P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // Astron. J. – 1993. – 105, N 3. – P. 1114–1144.
- 34. Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B., et al. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratoshpere // J. Atmos. Sci. – 1980. – 37. – P. 1342– 1357.
- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. Infrasound monitoring for atmospheric studies. – Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. – 734 p.
- Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. — 2013. — 342. — P. 1069— 1073.
- 37. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // Science. – 2013. – 145 p.
- Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., et al. Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteorite-producting fireball that exploded over Romania on January 7, 2015// Proc. Romanian Acad. Ser. A. – 2016. – 17, N 2. – P. 133–136.

Стаття надійшла до редакції 30.10.17

## REFERENCES

- Alpatov V. V., Burov V. N., Vagin J. P., Galkin K. A., Givishvili G. V., Gluhov J. V., Davidenko D. V., Zubachev D. S., Ivanov V. N., Karhov A. N., Kolomin M. V., Korshunov V. A., Lapshin V. B., Leshenko L. N., Lysenko D. A., Minligareev V. T., Morozova M. A., Perminova E. S., Portnyagin, J. I., Rusakov J. S., Stal N. L., Syroeshkin A. V., Tertyshnikov A. V., Tulinov G. F., Chichaeva M. A., Chudnovsky V. S., Shtyrkov A. Y. Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013. (FGBU "IPG" Publ., Moscow, Russia, 2013) [in Russian].
- Artem'jeva N. A., Shuvalov V. V. The Chelyabinsk meteoroid atmospheric plume. *Dinamicheskije processy v* geospherah. Vypusk 5. Geophysicheskije effekty padenija Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Special'nyj vypusk, 134–146. (GEOS, Moskva, 2014) [in Russian].
- 3. Shustov B. M., Ryhlova L. V. (eds.). *Asteroid-Comet Hazards: Yesterday, Today, and Tomorrow.* Moscow, Russia: Fizmatlit Publ., 384 p. (2010) [in Russian].
- 4. Solar System Research. **47** (4). (Thematical issue) (2013).

- 5. Bronshten V. A. Physics of Meteor Phenomena, 416 p. (Springer Netherlands, 1983).
- Bronsten V. A. The entry of the large meteoroids into the atmosphere. *Astronomicheskij vestnik*, 27 (1), 102–121 (1993) [in Russian].
- Bronsten V. A. About physical mechanism of the large meteor bodies quasicontinuous fragmentation. *Astronomicheskij vestnik*. 27 (3), 65–74 (1993) [in Russian].
- Bronsten V. A. The theory Grigoryan using to the case of the giant meteoroids fragmentation. *Astronomicheskij vestnik*. 28 (2), 118 –124 (1994) [in Russian].
- Bronsten V. A. Large meteor bodies fragmentation and destruction into the atmosphere. *Astronomicheskij vestnik*. 29 (5), 450–459 (1995) [in Russian].
- Gor'kavyj N. N., Liharyov D. S., Minnibayev D. N. The aerosol trace colour variations of the Chelyabinsk meteoroid. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. N. A. Antipin (ed.), 118–123 (Chelyabinsk, 2014) [in Russian].
- Gor'kavyj N. N., Tajdakova T. A. The interaction of the Chelyabinsk meteoroid with atmosphere. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. N. A. Antipin (ed.), 124–129 (Chelyabinsk, 2014) [in Russian].
- Gor'kavyj N. N., Tajdakova T. A., Provornikova E. A, Gor'kavyj I. N., Ahmetvaleev M. M. The aerosol plume of the Chelyabinsk meteoroid. *The Chelyabinsk Meteorite one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. N. A. Antipin (ed.), 130–135 (Chelyabinsk, 2014) [in Russian].
- Gossard E. E., Hooke Y. X., Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science). *Elsevier Scientific Pub. Co.*, 472 p. (1975)
- Grigoryan S. S. Motion and Destruction of Meteorites in Planetary Atmospheres. *Cosmic Research*, 17 (6), 724– 740 (1980).
- Gritsevich M. I., Stulov V. P., Turchak L. I. Classification of the Consequences for Collisions of Cosmic Bodies with the Earth. *Doklady Physics*, 54 (11), 499 – 503 (2009).
- Dinamicheskije processy v geospherah. Vypusk 5. Geophysical effects of the Chelyabinsk meteoroid fall: Proceedings IDG RAN. Thematical issue, 160 p. (GEOS, Moskva, 2014) [in Russian].
- Emelyanenko V. V., Popova O. P., Chugaj N. N., Sheljakov M. A., Pahomov Ju. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Birjukov E. E., Rybnov JU. S., Marov M. Ja., Ryhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Harlamov V. A., Trubeckaja I. A. Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event. (February 15, 2013). *Solar System Research*, **47** (4), 240 – 254 (2013).
- Adushkin V. V., Nemchinov, I. V. (eds). Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies. 310 p. (Moscow, Russia: ECC Akademkniga Publ., 2005) [in Russian].

- 19. Kruchinenko V. G. Mathematical and physical analysis of the meteor phenomenon, 294 p. (Kyiv, 2012) [in Ukrainian].
- Antipin N. A. (ed.) The Chelyabinsk Meteorite one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., 694 p. (Chelyabinsk, 2014) [in Russian].
- Stulov V. P., Mirskii V. N., Vislyi A. I. Aerodynamics of Bolides, 240 p. (Moscow, Russia: Nauka Publ., 1995) [in Russian].
- Chernogor L. F. *Physics and Ecology of Disasters*. 556 p. (V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., Kharkiv, 2012) [in Russian].
- Chernogor L. F. Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini*. N 10, 97 – 104 (2013) [in Russian].
- Chernogor L. F. Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Engineering Physics.* 8, 23 40 (2013) [in Russian].
- Chernogor L. F. Main effects of Chelyabinsk meteorite falling: physics and mathematics calculation results. *Meteorit Cheljabinsk — god na Zemle : materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii*. Eds N. A. Antipin, 229 — 264. (Chelyabinsk, 2014) [in Russian].
- Chernogor L. F., Liashchuk O. I. Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7, 2015. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 33 (6), 276 – 290 (2017).
- Shuvalov V. V., Artem'jeva N. A., Popova A. P. The shock wave parameters estimation caused the Chelyabinsk meteoroid fall. *Dinamicheskije processy v geospherah. Vypusk* 5. Geophysicheskije effekty padenija Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Special'nyj vypusk, 48 — 59 (GEOS, Moskva, 2014) [in Russian].
- Borovička J., Spurný P., Grigore V. I., Svoreč J. The January 7, 2015, superbolide over Romania and structural diversity of meter-sized asteroids. *Planetary and Space Science.* 143, 147 – 158 (2017).
- Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Problems of Atomic Science and Technology.* 86 (4), 136 139 (2013).
- Gehrels T. (Ed.). Hazards Due to Comets and Asteroids, 1300 p. (Univ. Arizona Press, Tucson; London, 1994).
- Gorkavyi N. N., Taidakova T. A., Provornikova E. A. Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide. *Solar system research.* 47 (4), 275–279 (2013).
- Grigoryan S. S. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar System Research*. 47 (4), 268 274 (2013).
- 33. Hills J.G., Goda M.P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* **105** (3), 1114 1144 (1993).
- Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B., et al. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 37, 1342–1357 (1980).

- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. Infrasound monitoring for atmospheric studies. — Dordrecht, Heidelberg , London, New York, Springer, 734 p. (2010).
- Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 342, 1069–1073 (2013).
- Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*, 145 p. (2013).
- Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., et al. Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteoriteproducting fireball that exploded over Romania on January 7, 2015. *Proc. Romanian Academy, Series A*, **17** (2), 133 – 136 (2016).

Received 30.10.17

## Л. Ф. Чорногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

## ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ РУМУНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА. 1

Проведено комплексне моделювання процесів у всіх геосферах, що були зумовлені падінням та вибухом типового метеороїда. В якості прикладу притягується подія, яка мала місце над Румунією 7 січня 2015 р. Оцінено механічні, оптичні, газодинамічні та теплові ефекти, що супроводжували падіння румунського метеороїда. Показано, що основне енерговиділення (біля 10<sup>12</sup> Дж) мало місце поблизу висоти 44 км, де швидкість втрат маси досягала приблизно 14.5 т/с, потужність оптичного випромінювання — біля 1 ТВт. Поблизу епіцентру вибуху метеороїда тиск у фронті ударної хвилі складав декілька десятків паскалів. Проліт космічного тіла призвів до утворення газопильового плюму. Нагрітий слід від метеороїда остигав впродовж кількох секунд.

*Ключові слова*: метеороїд, взаємодія з атмосферою, механічні, оптичні, газодинамічні та теплові ефекти, газопиловий плюм.

#### L. F. Chernogor

V. N. Karazin National University of Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

## PHYSICAL EFFECTS OF THE ROMANIAN METEOROID. 1

Here, we present a comprehensive modeling study of the processes induced in all geospheres by the passage and explosion of a representative meteoroid. As an example, we analyze the event that occurred over Romania on January 7, 2015. The modeling allows estimating of mechanical, optical, gas-dynamical, and thermal effects associated with the passage of the Romanian meteoroid. The major release of energy  $(10^{12} \text{ J})$  is shown to occur at approximately 44 km altitude where the rate of mass loss and the optical radiation power have reached approximately 14.5 t/s and 1 TW respectively. The pressure at the shock at the epicenter of the meteoroid explosion was equal to several dozen pascals. The passage of the cosmic body led to the formation of a gas-dust plume. The hot trace from the meteoroid was cooling down for a few seconds.

*Keywords*: meteoroid, interaction with atmosphere, mechanical, optical, gas-dynamic and thermal effects, gas-dust plume. doi: https://doi.org/10.15407/knit2018.01.071

УДК 629.76:620.3

# М. М. Элькади, М. С. Хорольский, А. Ф. Санин

Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днипро, Украина

# НАНОТЕХНОЛОГИИ — ОДНО ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Эластомерные материалы, в первую очередь резина, широко используются для производства составных частей и элементов конструкций объектов ракетно-космической и авиационной техники. Один из эффективных способов улучшения технических характеристик резин есть наполнение твердыми, жидкими или газообразными наполнителями, которые, равномерно распределяясь в объеме новосозданной композиции, улучшают их физико-механические и технологические свойства. Действие наполнителей определяется множеством факторов, в том числе формой и размерами частиц наполнителя, количеством наполнителя, его типом и структурой, особенностями взаимодействия частиц наполнителя с каучуком и другими ингредиентами. Использование в качестве наполнителя углеродных нанотрубок — один из методов получения резин с улучшенными техническими характеристиками.

**Ключевые слова:** ракетно-космическая техника, эластомерные материалы, теплозащитные покрытия, углеродные нанотрубки, технические характеристики.

Во время горения заряда твердого топлива в ракетном двигателе (РДТТ) часть тепла от продуктов сгорания передается корпусу двигателя и заряду. Интенсивность этой теплоотдачи определяет тепловое состояние основных элементов конструкции двигателя: стенок корпуса, соплового блока, газодинамических органов управления и других. Для проектирования этих элементов и расчета их тепловой защиты необходимо знать основные законы теплообмена. Это позволит учитывать тепловые потери и их влияние на внутрибаллистические процессы в РДТТ и на значения выходных характеристик двигателя.

В большинстве случаев при работе двигателей стенки перегреваются, поэтому необходима тепловая защита. Чаще всего теплозащитное покрытие (ТЗП) изготавливается на основе эластомерных материалов. Основным ингредиентом ТЗП является каучук, на ос-

© М. М. ЭЛЬКАДИ, М. С. ХОРОЛЬСКИЙ, А. Ф. САНИН , 2018

нове которого изготавливается резина. Резина — это многокомпонентная система, в которую кроме каучука входят ингредиенты различных групп, основными из которых являются вулканизующая группа, группа наполнителей, группа пластификаторов, антипиренов и других. Разные наполнители добавляются, как правило, для улучшения физико-механических характеристик резины. Выбор того или иного наполнителя зависит от его свойств (прочность, температура плавления, удельная поверхность и так далее). Технический углерод различных марок П-514 и П-803 (согласно ГОСТ 7885-86) широко используется для производства резины благодаря своим высоким техническим и стоимостным характеристикам, образуя в резине высокопрочные углерод-углеродные связи.

В современной технике, где необходим высокий температурный режим, высокая прочность и другие свойства, используют материалы, наполненные углеродными нанотрубками (УНТ). Впервые УНТ были



Рис. 1. Схема расположения плоскостей из углеродных нанатрубок

запатентованы в 1991 г. японским ученым Иидзимой. Углеродные нанотрубки играют большую роль в создании электронных приборов и всевозможных датчиков, которые также могут использоваться в космической отрасли, особенно в спутниках [1].

В сфере полимерных композиционных материалов (ПКМ) и металлических композиционных материалов (МКМ) углеродные нанотрубки нашли широкое применение. Их можно использовать для армирования различных структур ПКМ и МКМ для разнообразных целей. Также защитные слои можно получить с помощью армирования поверхностей изделий УНТ [2—4].

Углеродные нанотрубки представляют собой тонкие цилиндрические структуры с полусферическими торцами диаметром от одного до нескольких десятков нанометров, что примерно в 3500 раз меньше диаметра человеческого волоса. Длина нанотрубки составляет до 40 мкм [5]. Согласно данным [2, 3] модуль упругости УНТ при растяжении составляет 500...5000 ГПа, удельная прочность при растяжении — 200...750 ГПа, предельное растяжение в композите — 20...40 %, плотность УНТ близка к 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Углеродные нанотрубки обычно состоят из одной или нескольких свернутых в трубку графеновых плоскостей с поверхностями, составленных из правильных шестиугольников с атомами углерода в вершинах (рис. 1).

Вектор свертывания углеродных нанотрубок составляет

$$C_h = na_1 + na_2$$

В резинах можно применять как одностенные, так и многостенные углеродные нанотрубки, которые являются активными наполнителями. Активные наполнители — частицы углеродных нанотрубок или их агрегаты, распределенные в массе, соединяясь с молекулами каучука и другими ингредиентами резиновой смеси, образуют пространственную сетку, пронизывающую всю массу каучука в разных направлениях, превращаясь в непрерывную структуру.

Вулканизаты с активным наполнителем — углеродными нанотрубками — имеют увеличенные прочностные показатели, сопротивление раздиру и истиранию, теплозащитные свойства. Одно из условий получения повышенных технических характеристик резин с углеродными нанотрубками — хорошее диспергирование последних в массе резиновой смеси. При этом должна быть соблюдена оптимальная дозировка, иначе предполагаемый технический эффект получить не удастся.

Следует отметить, что уплотнители подвижных соединений, изготовленные из резин, содержащих углеродные нанотрубки, имеют более высокую работоспособность при высоких температурах.

Сравнительные технические характеристики углеродных нанотрубок с другими материалами

Материал	Прочность при растяжении, ГПа	Удельный модуль упругости, ГПа
Углеродные нанотрубки	3001500	5002500
Углеродные волокна	37	100400
Высокопрочная сталь	~ 0.4	26
Сравнительные технические характеристики УНТ с другими высокопрочными материалами [2, 3] приведены в таблице.

Один из подходов использования многостенных углеродных нанотрубок (МСУНТ) — добавка к основным компонентам в качестве наполнителя. Углеродные нанотрубки обеспечивают повышенную электропроводность и теплопроводность материала, к которому они добавлены. Многостенные углеродные нанотрубки также представляют возможность значительно улучшить механические свойства материалов (например, прочность при растяжении) [7].

При использовании нанотрубок в качестве наполнителя принимается разное процентное соотношение к основному компоненту в зависимости от свойств и назначения, которые необходимо получить. Стоимость многослойных углеродных нанотрубок значительно ниже, чем одностенных углеродных нанотрубок. Поэтому на первом этапе стоит задача проводить лабораторные исследования на резиновой смеси с MCУHT в качестве наполнителя, чтобы получить первые необходимые образцы для дальнейших исследований.

Углеродные нанотрубки характеризуются тем, что они очень легкие и обладают низкой плотностью (2000 кг/м<sup>3</sup>), благодаря чему они могут быть эффективно применены в ультралегких композиционных материалах в сочетании с углеродными волокнами, плотность которых в среднем составляет 1800 кг/м<sup>3</sup> [6].

Частицы УНТ соединены силами Ван-дер-Ваальса, и это улучшает механические свойства резиновой смеси. Сила Ван-дер-Ваальса — это сила притяжения между соседними молекулами. По мере увеличения расстояния между УНТ сила притяжения становится слабой, и взаимодействие между УНТ становится маловероятным. Наоборот, когда УНТ близки друг к другу и в широком контакте, взаимодействие с УНТ, скорее всего, произойдет, и следовательно, свойства резины улучшатся.

Изделия на основе эластомерных материалов широко используются практически во всех видах техники, но нет универсального материала, из которого можно было бы производить изделия для любых условий эксплуатации. Поэтому постоянно ведутся работы в поисках новых способов получения материалов с улучшенными техническими характеристиками, благодаря которым в дальнейшем станет возможным создание дешевых многоразовых ракет-носителей [3].



*Рис.* 2. Схема расположения теплозащитных покрытий с углеродными нанотрубками в ракетных двигателях на твердом топливе



*Рис. 3.* Одностенные углеродные нанотрубки в разных ориентациях (авторское право Винсент Креспи, используется с разрешением)

Не являются исключением и эластомерные материалы, изделия из которых обеспечивают работоспособность многих узлов и агрегатов объектов ракетно-космической техники и их составных частей в экстремальных условия эксплуатации. Особенно это касается теплозащитных материалов ракетных двигателей на твердом топливе, которые должны выдерживать высокие температуры (рис. 2).

В настоящее время в качестве материалов внутренней теплозащиты корпусов РДТТ используются специальные резины на основе различных каучуков, содержащие наполнители разной активности. Вместе с тем их теплозащитные свойства необходимо улучшать.

Одним из перспективных направлений повышения защитных свойств композиционных материалов на основе резины является применение в качестве наполнителей углеродных нанотрубок, представляющих собой протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких нанометров и длиной до нескольких сотен нанометров. Именно такая структура наполнителя позволяет создать более эффективное композиционное теплозащитное покрытие на основе резины. В 2006 г. углеродные нанотрубки были обнаружены в дамасской стали [1].

Углеродные нанотрубки классифицируются как семейство фуллеренов, т. е. бакминстерфуллерен, который является формой углерода. Другие формы углерода включают алмаз, графит, лонсдейлит и аморфный углерод. УНТ имеют цилиндрические структуры, типичные примеры показаны на рис. 3 [4].

Для аэрокосмической промышленности возможно получение выгоды при использовании нанотехнологий при создании новых материалов для транспортных средств, двигательных систем, узлов агрегатов для теплового управления, сохранении энергии, электронных и вычислительных систем, датчиковых устройств [3]. Например, известно, что введение УНТ значительно изменяет свойства исходного материала. Добавка около 10 % УНТ в пропилен приводит к увеличению его прочности на разрыв вдвое, а добавка 5 % в алюминий удваивает его прочность [1]. УНТ предполагают создание нанопроводов, которые будут иметь значительно более высокую проводимость при комнатной температуре и меньший вес, чем медь или любые ее альтернативы (например, алюминий) [4].

Возможно создание композиционного материала, армированного нанотрубками (около 20 %), который при давлении около 10 ГПа будет испытывать примерно 1 % деформации. Создание такого композиционного материала будет включать диспергирование нанотрубок в связующие, которые будут молекулярными по своей природе, возможно, монослоями с толщиной от сотен нанометров до микрометров. Макеты и изготовление должны быть нетрадиционными и пока не определены. Изготовление деталей сложных форм не должно создавать серьезных технических проблем.

Многочисленные усилия в разработке нановолокон продолжаются, но процесс изготовления очень ограничен и находится в зачаточном состоянии. Гленн приступил к исследованию композиционных материалов с высокой прочностью и низкой стоимостью, но необходимо провести дополнительную работу для разработки технологии производства материалов из углеродного волокна и УНТ. Необходимо производить небольшие партии волокон со стабильными свойствами и продолжать исследования их воздействия на окружающую среду. Кроме того, необходимо создать необходимую материальную систему до уровня производства. Эта работа должна продолжаться в течение нескольких десятилетий, чтобы получить КМ с более высокими техническими характеристиками. Это обеспечило бы, чтобы через 20—30 лет новые продукты, использующие нановолокна, были доступны для промышленности [4].

Углеродные нанотрубки можно использовать не только в виде покрытия. Они играют ключевую роль в защите электрожгутов (работающих при температурах выше 240 °C), создании «Bearingless Motor Hub», которыми «Eurocopter» оборудует свои вертолеты для снижения веса конструкции [4].

## выводы

1. Углеродные нанотрубки имеют большой потенциал в ракетной технике в рабочих зонах, где температура выше 2500 °С, принимая во внимание увеличение степени черноты и коксовых остатков.

2. Вулканизаты с углеродными нанотрубками как активным наполнителем имеют улучшенные теплозащитные свойства, а также упруго-прочностные показатели, сопротивление раздиру и истиранию.

3. Следует также учесть, что объем теплозащитного покрытия в РДТТ достаточно большой, и тот факт, что плотность углеродных нанотрубок не превышает 2000 кг/м<sup>3</sup>, делает их перспективными для применения в качестве активного наполнителя теплозащитного эластомерного материала и снижения массы конструкции РДТТ в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Куцова В. З., Котова Т. В.* Углеродные нанотрубки: Учеб. пособ. — Днепр: НметАУ, 2014. — С. 6—11.
- 2. *Мищенко С. В., Ткачев А. Г.* Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение // Машиностроение. — 2008. — **320**. — С. 17—18.
- Charles E. H., Mark J. S., Hugh R. G. A survey of emerging materials for revolutionary aerospace vehicle structures and propulsion systems. — Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2002. — P. 4—6.
- Dever P. D., Duffy K. P., Provenza A. J., et al. Assessment of technologies for noncryogenic hybrid electric propulsion. — Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2015. — P. 13—15.
- Gullapalli S., Wong M. S. Nanotechnology: A Guide to Nano-Objects // Chem. Eng. Progr. – 2011. – 107, N 5. – P. 28–32.

- Hungo C., Yeonsu J., Youngjin J., et al. Fabrication and applications of carbon nanotube fibers // Carbon Lett. – 2012. – 4. – P. 191–194.
- Larson D. L., Boyer E., Wachs T., et al. Mechanical and combustion performance of multi-walled carbon nanotubes as an additive to paraffin-based solid fuels for hybrid rockets. — Pennsylvania State University, 2008. — Thesis 1–2.

Стаття надійшла до редакції 21.09.17

## REFERENCES

- 1. Kutsova V. Z., Kutova T. V. Uglerodnye nanotrubki: Uchebnoe posobie, 6–11 (NmetAU, Dnepr, 2014) [in Ukrainian].
- Mishenko S. V., Tkachov A. G. Carbon nanomaterials. Production, properties, application. *Mechanical Engineering*, 320, 17–18 (2008) [in Russian].
- Charles E. H., Mark J. S., Hugh R. G. A survey of emerging materials for revolutionary aerospace vehicle structures and propulsion systems, 4–6 (National Aeronautics and Space Administration, Washington, 2002) [in English].
- Dever P. D., Duffy K. P., Provenza A. J., et al. Assessment of technologies for noncryogenic hybrid electric propulsion, 13–15 (National Aeronautics and Space Administration. Article, Washington, 2015) [in English].
- Gullapalli S., Wong M. S. Nanotechnology: A Guide to Nano-Objects. *Chemical Engineering Progress*, **107** (5), 28–32 (2011) [in English].
- Hungo C., Yeonsu J., Youngjin J., et al. Fabrication and applications of carbon nanotube fibers. *Carbon Letters*, N 4, 191–194 (2012) [in English].
- Larson D. L., Boyer E., Wachs T., et al. Mechanical and combustion performance of multi-walled carbon nanotubes as an additive to paraffin-based solid fuels for hybrid rockets. *Thesis*, 1–2 (Pennsylvania State University, 2008) [in English].

Received 21.09.17

#### М. М. Елькаді, М. С. Хорольський, А. Ф. Санін

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

### НАНОТЕХНОЛОГІЇ— ОДИН ІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ СТВОРЕННЯ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛАСТОМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Еластомерні матеріали, насамперед гума, широко використовуються для виробництва складових частин і еле-

ментів конструкцій об'єктів ракетно-космічної та авіаційної техніки. Один з ефективних способів поліпшення технічних характеристик ґуми є наповнення твердими, рідкими або газоподібними наповнювачами, які, рівномірно розподіляючись в обсязі новоствореної композиції, покращують її фізико-механічні та технологічні властивості. Дія наповнювачів визначається багатьма чинниками, зокрема формою і розмірами частинок наповнювача, кількістю наповнювача, його типом і структурою, особливостями взаємодії частинок наповнювача з каучуком та іншими інгредієнтами ґумової суміші. Використання як наповнювач вуглецевих нанотрубок один із методів отримання ґум з поліпшеними технічними характеристиками.

*Ключові слова*: ракетно-космічна техніка, еластомерні матеріали, теплозахисні покриття, вуглецеві нанотрубки, технічні характеристики.

M. M. Elkady, M. S. Khorolskyi, A. F. Sanin

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

#### NANOTECHNOLOGIES — ONE OF THE FUTURE DIRECTIONS OF THE COMPOSING OF NEW ELASTOMERIC STRUCTURAL MATERIALS

Elastomeric materials are widely used for the production of components and structural elements of rocket, spacecraft, and aviation equipment. Rubber is the most common of the elastomeric materials used for this purpose. One of the most effective ways to improve the technical properties of rubbers is to fill with solid, liquid or gaseous fillers. The last ones evenly distributed in the volume of the newly created composition improve its physical and mechanical properties. The action of fillers is determined by a variety of factors, including a shape and size of the filler particles, the amount of filler, its type and structure, the characteristics of the interaction of the filler particles with rubber and other ingredients. We discuss the use of carbon nanotubes as filler, which is one of the methods for obtaining rubbers with improved technical properties.

*Keywords*: rocket and space technology, elastomeric materials, heat-resistant coatings, carbon nanotubes, technical properties.



31 січня 2018 року відійшов (а вірніше, раптово відлетів) у вічність Леонід Костянтинович Каденюк, перший і єдиний космонавт (астронавт) України, Герой України, генерал-майор авіації Збройних Сил України, президент Аерокосмічного товариства України, почесний доктор Чернівецького національного університету імені Ю. Федьковича, радник Прем'єр-міністра України та Голови Державного космічного агентства України, заступник Генерального інспектора Генеральної військової інспекції при Президентові України з питань авіації і космонавтики, народний депутат України 4-го скликання, Народний Посол України, Почесний громадянин м. Чернівці.

Леонід Каденюк народився 28 січня 1951 року у селі Клішківці Хотинського району Чернівецької області у сім'ї сільських вчителів. 1967 року вступив до Чернігівського вищого військового авіаційного училища льотчиків, де отримав диплом льотчика-інженера за спеціальністю «Пілотування Світлої пам'яті першого космонавта України Леоніда Каденюка

і експлуатація літальних апаратів» і працював у цьому училищі льотчиком-інструктором. У серпні 1976 року був відібраний до загону космонавтів СРСР, і у 1977 році після навчання у Центрі підготовки льотчиків-випробувачів отримав диплом і кваліфікацію «льотчик-випробувач». У 1977-1979 роках пройшов загальнокосмічну підготовку і отримав кваліфікацію космонавта-випробувача, і потім до 1983 року був космонавтом-випробувачем у групі багаторазової космічної системи «Буран». У 1984—1988 роках — льотчик-випробувач Державного науково-дослідного інституту Військово-повітряних сил СРСР. У 1989 році закінчив літакобудівний факультет Московського авіаційного інституту. У 1988—1996 роках — космонавт-випробувач, льотчик-випробувач багаторазової космічної системи «Буран». Брав участь у відпрацьовуванні глісади зниження при заходженні на посадку космічного корабля «Буран» на літаках МіГ-31 та МіГ-25. У 1990—1992 роках пройшов підготовку як командир транспортного корабля «Союз-ТМ». Брав участь у розробці та випробуванні авіаційно-космічних систем, у їхньому ескізному та макетному проектуванні, а також у льотних випробуваннях систем. За час підготовки до космічних польотів готувався до проведення наукових експериментів на борту космічних літальних апаратів у найрізноманітніших напрямах: біологія, медицина, метрологія, екологія, геологія, астрономія, геоботаніка, дослідження природних ресурсів Землі із космосу.

У 1995 році Леонід Каденюк був відібраний до групи космонавтів Національного космічного агентства України. Пройшов підготовку в НАСА до космічного польоту на ККБВ «Колумбія», місія STS-87, як спеціаліст з корисного навантаження. Цей політ відбувся у період з 19 листопада по 5 грудня 1997 року. Дублером Леоніда Каденюка був Ярослав Пустовий. Готуючись до польоту на космічному кораблі багаторазового використання (ККБВ) НАСА, наш видатний космонавт із квітня по жовтень 1996 року працював науковим співробітником відділу фітогормонології Інституту ботаніки імені М. Г. Холодного НАН України. А під час польоту й пізніше, а саме від жовтня 1997 р. по червень 2000 р. та у грудні 2010 р., Леонід Каденюк був старшим науковим співробітником Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України.

# Відомості про Леоніда Каденюка зі сторінки біографій астронавтів НАСА (https://www.jsc.nasa. gov/Bios/PS/kadenyuk.html):

«In 1990, following the Ukrainian-USSR State Agreement on a Collaborative Space Program, he was appointed to command the Ukrainian space crew. In the following two years, he trained to command Soyuz-TM-S during its docking with unmanned Buran and Mir station (mission was canceled due to financial difficulties), completed the full course of space training for a commander of the SOYUZ-TM, and also took the full course of manual docking of space ships, using special training equipment. In subsequent years, he underwent engineering and flight training courses as commander of the Buran Space System. Using MIG-31 and MIG-25 he mastered and improved the trajectory for lowering and landing the Buran spacecraft.

In 1996, he transferred to the Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, as a scientific investigator developing the collaborative Ukrainian-American experiment in space biology.

NASA EXPERIENCE: Colonel Kadenyuk is one of the first NSAU Astronaut group selected in 1996 by the National Space Agency of Ukraine. In November 1996, NSAU and NASA assigned him to be one of two payload specialists for the Collaborative Ukrainian Experiment (CUE) which was flown on STS-87. He participated in payload specialist training at the Johnson Space Center and was the prime payload specialist aboard Space Shuttle Columbia on STS-87, (November 19 to December 5, 1997). STS-87 was the fourth United States Microgravity Payload flight and focused on experiments designed to study how the weightless environment of space affects various physical processes, and on observations of the Sun's outer atmospheric layers. Two members of the crew performed an EVA (spacewalk) which featured the manual capture of a Spartan satellite, in addition to testing EVA tools and procedures for future Space Station assembly. In completing his first mission Kadenyuk orbited the Earth 252 times, traveled 6.5 million miles and logged a total of 15 days, 16 hours and 34 minutes in space.»

Редакційна колегія журналу «Космічна наука і технологія», поділяючи біль непоправної втрати для української космічної галузі, підготувала матеріали на пам'ять про Леоніда Костянтиновича Каденюка. 5 грудня 2017 року відбулося спільне засідання Ради з космічних досліджень НАН України і Науково-технічної ради Державного космічного агентства України, урочиста частина якого була присвячена 20-річчю з часу завершення польоту Леоніда Каденюка у космос та проведенню спільного українсько-американського експерименту з космічної біології. Пропонуємо Вам ознайомитися з виступами-спогадами про цей політ, які пролунали під час засідання, а саме виступами Едуарда Івановича Кузнєцова, радника Голови Державного космічного агентства України, і Леоніда Костянтиновича Каденюка. Окремо подаємо нарис про Леоніда Каденюка та фотографії з історії проведення науково-технічної програми з космічної біології на шатлі «Колумбія» у 1997 році, підготовлений Єлизаветою Львівною Кордюм, членом-кореспондентом НАН України, завідувачем відділу Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України.

# Виступ Е. І. Кузнєцова

# Шановні колеги! Шановні друзі!

Дійсно, сьогодні — надзвичайний день, тому що 5 грудня 1997 року ніхто у невеликому містечку Коко-Біч не спав, ніхто не спав на орбіті, всі чекали на успішне приземлення космічного корабля «Колумбія». Ми всі, хто з Космічного агентства, хто з Академії наук, журналісти неймовірно хвилювались. Рано-вранці всі з'їхалися на космодром, на узбіччя посадкової смуги й очікували, коли з'явиться «Колумбія». Ті, хто вели репортаж, казали нам «ось, ось, ось...». Потім пролунав досить потужний рев, що означав перехід корабля від надзвукової швидкості до звичайної, і ми побачили, як «Колумбія» зробила невеличкий маневр і успішно, тихесенько так, приземлилася на посадкову смугу, відкрилися парашути, і вона зупинилася. Це означало, що політ завершився благополучно, і все, що відбувалося 16 днів на орбіті, пройшло успішно. Ми очікували зустрічі з Леонідом Костянтиновичем і членами команди, які разом з ним літали. Всі були і стомлені, і раді, і щасливі, що те напруження, яке тривало весь час, спало. Всі ми очікували, коли з'явиться екіпаж з космічного корабля. Зустрілися, обнялися, сфотографувалися...

Космонавтів забрали на медичне обстеження і перевірку речей. Наша невелика делегація з Космічного агентства почала збиратися додому. Юрій Щербак, посол України у Сполучених Штатах Америки, сів у машину їхати в аеропорт і повертатися у Вашингтон. У мене був один резервний день, я взяв собі машину напрокат, щоб провести невелику екскурсію навколо космодрому. Наші вчені залишалися на певний час у США, щоб одразу опрацювати результати експериментів...

Це була надзвичайно цікава робота, яка тривала близько двох років. І ця робота продовжувалася після приземлення космічного корабля, оскільки і космонавти, і вчені на Землі з Інституту ботаніки Національної академії наук та інших установ напрацювали й отримали важливі результати під науковим керівництвом Єлизавети Львівни Кордюм. Про це написали пізніше Єлизавета Львівна та американський вчений Дейв Чепмен у книзі «Рослини в космосі».

Як це все починалося? Починалося все з таких, на перший погляд, невеличких подій. У 1993—1994 роках в Україну приїздило багато делегацій, зокрема з НАСА, серед них і Даніел Голдін, тодішній керівник НАСА. Зустрічався він з керівником Космічного агентства України Володимиром Павловичем Горбуліним, обговорювали напрями співробітниитва, зокрема проведення спільних експериментів на космічних кораблях типу шатлів. Коли ми зрозуміли, що є така зацікавленість, то вирішили просити президентів наших країн під час їхньої зустрічі домовитися і дати старт цьому проекту. У 1994 році Леонід Данилович Кучма і Біл Клінтон підписали угоду про використання фахівця з українського боку в космічних експериментах на космічних кораблях багаторазового використання і дали завдання Національному космічному агентству і НАСА готувати такий проект. Ми рік готували пропозиції, і вони були прийняті. Коли вони отримали погодження з боку президентів, НАСА і Національного космічного агентства України, підключилася Національна академія наук України для розробки експериментів і їхнього проведення на борту однієї з космічних місій НАСА. Звичайно, фахівці НАСА знали, над чим працюють вчені в нашій Академії наук, але вони обрали космічну біологію, оскільки знали роботи Єлизавети Львівни Кордюм і Інституту ботаніки. Попрацювавши разом, вони обрали десять експериментів для проведення на шатлі. Цей період був насичений організаційними питаннями, погодженням необхідних документів. Мені доручили відповідати за цей проект з боку космічного агентства України, а з боку Академії наук за проект відповідала Єлизавета Львівна Кордюм. Отже, була сформована науково-дослідна програма космічних експериментів.

Наступним етапом був відбір фахівця з українського боку, який би міг полетіти і реалізувати ці експерименти. До мене підходили різні фахівці. Серед них були вже підготовлені космонавти, зокрема космонавт-дослідник Юрій Крикун — журналіст за фахом, який проходив відбір у космонавти ще в радянські часи. Ми пішли іншим шляхом і оголосили конкурс на відбір такого фахівця. У конкурсі брали участь 28 достойних претендентів, і серед них був Леонід Костянтинович Каденюк.

Ше одна програма, яку вирішили включити, це була освітня програма. Її запропонували американські колеги, і ми дослухалися до цієї ініціативи. Вона виявилася досить цікавою для школярів. До неї з українського боку залучилися установи Міністерства освіти і науки та Мала академія наук. Разом близько 20 тисяч школярів із України і приблизно така ж кількість школярів у США брали в ній участь... Вчора, 4 грудня, ми разом із Леонідом Костянтиновичем проводили зустріч в Національному екологічному центрі в Києві, яка була присвячена реалізації цієї освітньої програми. На зустрічі були присутні близько ста учнів, але найголовніше, що ми побачили, що наші зусилля 20-річної давнини не пропали даремно. Нам вдалося знайти людей, які тоді були школярами і брали безпосередню участь в освітній програмі, і ця участь відбилася у їхній подальшій долі, їхній профорієнтації, формуванні світогляду як майбутнього вченого-біолога. Зокрема на цій зустрічі були Денис Іванович Білик, нині кандидат біологічних наук, доцент Національного університету «Києво-Могилянська академія», старший науковий співробітник лабораторії діагностики біологічних систем; Леонід Горобець, асистент кафедри екології та зоології Інституту біології і медицини Київського національного університету імені Тараса Шевченка; Олександр Баранський, кандидат біологічних наук, керівник Астрономічної обсерваторії учнівської молоді Малої академії наук, старший науковий співробітник Національного ботанічного саду НАН України. Це тільки декілька людей, яких ми віднайшли і які були присутні на цьому заході. Але ці приклади демонструють велику роль проведення освітніх програм під час космічних місій.

Підготовка першого космонавта України відбувалася в перші роки незалежності нашої країни. Ми не мали досвіду, по-перше, проведення таких міжнародних проектів, по-друге, ми вперше співпрацювали з НАСА, по-третє, ми вперше готували космонавта для виконання завдань, які поставила Академія наук України. Нам вдалося все виконати, і цей проект — політ Леоніда Каденюка і виконання спільного українсько-американського експерименту — залишається найбільш цікавим і вдалим із реалізованих за всі 25 років космічних досліджень в незалежній Україні. Я відмічаю це, бо він виконувався у 1990-х роках, вже потім були і «Морський старт», і наземні старти та ін.

У ході підготовки до польоту ми провели роботу, щоб ця подія відзначилася в історії України. Ми знарядили Леоніда Костянтиновича певними атрибутами нашої держави — Конституцією, гербом, записом гімну, прапором. Крім того, з ним були герб Києва, портрет Миколи Кузьмича Янгеля, «Кобзар» Тараса Шевченка. Всі ці речі потім були передані в музеї із сертифікатами, що всі ці предмети побували у космосі. Ми вперше провели зв'язок космонавта на шатлі з Президентом України та з учнями, які брали участь в освітній програмі.

Я хочу відмітити, що ми ще тоді, в 1990-х роках, планували запустити супутник зв'язку «Либідь», і тоді ж ми заснували телерадіокомпанію «Либідь», яка повинна була висвітлювати підготовку і політ Леоніда Каденюка. Тут, на нашому засіданні, присутні директор цієї компанії Белявенко та продюсер Валерія Іваненко, яку запросили тоді вести репортаж. Якщо ви чули той репортаж, то тонесенький голос за кадром належить саме їй.

Тобто, у нас був комплексний підхід до підготовки польоту. Ми зокрема підготували й спеціальні годинники, яких ще не було, — вони з емблематикою цього польоту. Зараз я вам продемонструю один із тих, які побували у космосі і який я зберіг. Ці годинники дали старт роботі Київського годинникового заводу, який зараз успішно працює.

Були й проблеми організаційного характеру, оскільки проект проводився вперше. Зокрема й привезти космонавта зі Сполучених Штатів Америки. Коштів не було, але були люди, які розуміли наші проблеми. Зокрема серед них був тодішній заступник директора однієї з авіаційних компаній Арон Майберг, з яким я домовився, щоб безкоштовно прилетіли в Київ і Леонід Костянтинович із родиною, і його дублер Ярослав Пустовий. В організації зустрічі в Києві допоміг Володимир Павлович Горбулін, який на той час працював уже в Адміністрації Президента України. Зустрічали й урядовці з Космічного агентства і мер Києва Олександр Омельченко. Найголовніше, що на зустріч приїхала мама Леоніда Костянтиновича, і ми нашого першого космонавта гідно зустріли.

На жаль, обставини складаються так, що космічна галузь України на даний час має багато проблем, насамперед фінансування. Цього року Космічне агентство очолив спеціаліст із Державного конструкторського бюро «Південне», — Дегтяренко Павло Глібович. Йому вдалося вирішити окремі питання фінансування на наступний період, і я сподіваюся, що справи космічної галузі будуть дещо підправлені. Нагадаю, що останні 10 років ми фінансувалися менш ніж на 25 %, а в таких умовах надзвичайно важко працювати.

Сьогодні у нас свято, вітаю всіх із цією знаменною подією в історії космічних досліджень в Україні!

# Виступ Л. К. Каденюка

## Шановні друзі!

Розмова про космос — досить різнотемна. Якщо говорити про мій космічний політ, то тут можна пригадати і мій відбір у космонавти ще в радянські часи, і досить потужну підготовку (у порівнянні з американською системою), бо нас готували як космонавтів-універсалів, які повинні знати все. Ми вивчали біологію й медицину, астрономію й астрофізику, геологію й екологію, — все це було. Я за характером такий, що мені все цікаво, тому із задоволенням вивчав всі ці науки. Отже, певним чином ще під час підготовки у загін космонавтів у Зоряному містечку я вже був готовий проводити біологічні експерименти у космосі. Начальником першого управління, яке займалося підготовкою космонавтів, був Володимир Джанібеков. Перед моїм приїздом у Київ він передав мені відповідні документи, де було засвідчено мою підготовку з біології. У Києві розпочалася моя наукова підготовка до польоту...

Сьогодні, 5 грудня 2018 року, минуло рівно двадцять років, як відбулася посадка космічного корабля багаторазового використання «Колумбія», на якому я здійснював політ. Трапилося це о 6 годині 30 хв ранку за місцевим часом штату Флорида або о 13 год 30 хв за київським часом. Я, сидячи у кріслі перед цим виступом, просто пригадав ті відчуття, які мене супроводжували під час повернення на Землю. А саме, перехід від невагомості до гравітації. Вони дуже цікаві, ці відчуття. Для мене вони були надзвичайним відкриттям. Кожен організм має свою індивідуальність, і мій також. Але під час цього короткого у долі секунди відрізку часу переходу організму від невагомості до гравітації у мене було таке відчуття, наче я звільнився від невагомості, як від якогось тягаря на плечах. Це відчуття мене дуже здивувало. Відразу я почав сприймати дійсність набагато чіткіше, ніж там, перебуваючи у стані невагомості. У свідомості людини є така модель простору, яка побудована в земних умовах як зоровим аналізатором, так і гравітаційною вертикаллю, гравірецепторами. Ми народжуємося такими, навіть не знаючи про це. Так ось, коли я повертався з космосу, де під час польоту ця земна модель вертикальної гравітації була відсутня, я відчув, як підключилися гравірецептори і знову запрацювали. Я написав книгу «Місія Космос», де намагався це описати. Можна привести тут аналогію з налаштуванням різкості зображення у біноклі, — так і в мене після переходу з невагомості у гравітацію сприйняття дійсності стало чіткішим. Я почав відчувати рухи корабля «Колумбія», початок і закінчення розворотів, коли він увійшов у атмосферу... Серед космонавтів є такі, які втрачають повністю цю модель простору, коли вони перебувають у стані невагомості: вони сприймають низ там, куди спрямовані ноги, а верх там, куди спрямована голова, незалежно від того, як орієнтований космічний корабель. Я старався підтримувати у собі цю орієнтацію тим, що відмічав для себе підлогу космічного корабля як початок відліку моделі простору. Але коли я дивився в ілюмінатор і бачив поверхню Землі, то моя свідомість моментально переключалася, і початком відліку одразу ж визначала поверхню Землі. Коли ж повертався зором у корабель, то підлога миттєво ставала початком відліку моделі простору. Можливо, це притаманно лише моїй психіці сприйняття невагомості.

Під час польоту я вирішив не обмежуватися поставленим українсько-американським біологічним експериментом і додатково проводив дослідження ще на дві теми: фізика стану невагомості і вплив невагомості на мене як на людський організм, для чого проводив певні вправи.

Уже в польоті я переконався, що людина, яка летить у космос, повинна володіти великими знаннями у найрізноманітніших областях науки. Тим більше від нього буде користі як від космонавта, і тим цікавіше буде йому самому. Для мене космічний простір на початку був наче величезна порожнеча без кордонів. Потім я переконався, що він переповнений інформацією і ставить перед людством питання, на які потрібно знаходити відповіді тут, на нашій планеті. Серед них виникають і філософські питання, зокрема коли дивишся на Землю з космосу і розумієш, яка вона красива, то виникає думка, що на ній повинно бути і життя красивим. Але коли згадуєш, як ми живемо, то усвідомлюєш, яким недосконалим є наше суспільство і як ми неправильно живемо.

Я хотів би пригадати той час, коли я був відібраний для польоту і прилетів до США. Вчив до цього активно англійську мову, бо у школі та у вузі вивчав французьку. Я закінчив, окрім Чернігівського вищого льотного училища, ще й Московський авіаційний інститут, Центр підготовки льотчиківвипробувачів, Центр підготовки космонавтів. Тоб-

то, у мене чотири універсальні дипломи. Хотів би пригадати тих людей, які супроводжували мене там, у Сполучених Штатах Америки, від самого початку. Тут у залі присутній професор Вадим Якимович Березовський, — я пригадую ті часи, коли Ви «возилися» зі мною і з Ярославом Пустовим, і з В'ячеславом Мейтарчаном, водили до лікарів, слідкували, як ми проходимо всі ті тести. Це незабутній час для мене, і я Вам щиро дякую. Для мене було великою честю стати учнем самої Єлизавети Львівни Кордюм, бо у Зоряному містечку нас, молодих космонавтів, готували за тими експериментами, які вона проводила з самого початку досліджень космосу. А космічна біологія є тут пріоритетною. Я вдячний Вікторові Приймі, який також у залі, за підготовку експериментів. Я спостерігав за роботою українських і американських вчених, бачив, наскільки вони з повагою ставилися один до одного. Звичайно, інколи, як це буває у творчих людей, виникали спірні робочі питання, які вирішувала Єлизавета Львівна, яка була для них незаперечним авторитетом. А я себе відчував ланкою, що об'єднує ці дві групи учених. Саме виконання експериментів для мене було дуже цікавим, особливо з дослідження впливу невагомості на процеси фотосинтезу та на розвиток рослин. Рослини рапсу мають надзвичайно стрімкий розвиток, — я переконався в цьому особисто, яким бурхливим був її розвиток в невагомості. Тут присутні вчені, які знають краще за мене про вплив невагомості на клітинному і молекулярному рівнях, тому я не буду вдаватися в деталі цієї проблеми.

Хотів би всім, хто брав участь у експерименті, подякувати. Тут присутня Валерія Іваненко, яка провела цікавий репортаж, в якому розповіла не тільки про мене, але й про кожного члена екіпажу, про експерименти, які ми повинні були проводити. Був такий епізод. Коли корабель відірвався від землі, Валерія Іваненко сказала: «Вітаю маму Леоніда Каденюка». А я подумав, що рано вітати до орбіти, ще двигуни працюють, і є небезпека вибуху корабля. Космічний корабель «Space Shuttle» (так само, як і «Буран») — на 90 % складається з палива стартова вага близько 2000 тонн. У цьому паливному баку 1.7 мільйонів літрів рідкого водню і близько 700 тисяч літрів рідкого кисню. Крім цього, є ще два твердопаливні прискорювачі, тому стартує фактично порохова бочка. Буває всяке, я не буду про це згадувати...

Хочу ще раз привітати всіх з цією історичною подією. Це було свято для всієї України та українців всього світу. Я хочу ще раз нагадати, що на космічному кораблі пролунав гімн України, там побував наш тисячолітній тризуб, і «Кобзар» Тараса Шевченка. До речі, наскільки мені відомо, це була перша друкована книга, яка побувала в космосі. Колись американські астронавти брали Коран, але він був не в друкованому варіанті, а на металевій пластинці.

Ще раз вітаю всіх зі святом, воно наше спільне!

# Нарис від Н. І. Адамчук-Чалої

Космічна фітобіологія сьогодні є провідним напрямком сучасної біології як у галузі вирішення фундаментальних проблем гравічутливості рослин, клітинних і молекулярних механізмів адаптації рослин до умов мікрогравітації, так і у створенні контрольованих біологічних систем життєзабезпечення людини у пілотованих польотах і розробки космічних біотехнологій.

На початку 1970-х рр. в Інституті мікробіології і вірусології Академії наук УРСР була розроблена теоретична база космічних біологічних експериментів з організмами, які під час польоту мають перебувати в активному фізіологічному стані. З того часу актуальним стає вивчення життєдіяльності організмів при їхньому тривалому перебуванні поза межами Землі, з'ясування механізмів адаптації до умов космічного польоту.

Дослідження структурно-функціональних змін фотосинтетичного апарату В. гара в умовах мікрогравітації були проведені з участю Л. К. Каденюка врамках спільного українсько-американського експерименту на ККБВ STS-87 під керівництвом члена-кореспондента НАН України Є. Л. Кордюм (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України) і професора Джеймса Гайкеми (США). Завдяки вперше проведеному комплексному аналізу формування фотосинтетичного апарату рослин «Astroplant» (Brassica гара), вирощених із насіння на борту космічного корабля "Columbia" місії STS 87 (19 листопада — 05 грудня 1997 р.), визначено, що рослина пристосовується до умов мікрогравітації більш широким спектром змін на клітинному, субклітинному і молекулярному рівнях регуляції і взаємозв'язку адаптаційних механізмів рослин до дії зміни сили тяжіння, ніж в умовах клиностатування. Вперше показано, що в умовах клиностатування прискорюється процес диференціації клітин мезофілу, збільшується кількість хлоропластів в них, розширюється площа міжклітинного простору, відбувається редукція частини гран з меншою кількістю подовжених тилакоїдів, збільшується парціальний об'єм тилакоїдів строми та експонованих у строму нестикованих ділянок тилакоїдів гран, крохмалю і пластоглобул, зростає вміст каротиноїдів у листках рослин.

# Нарис-спогад від Є. Л. Кордюм

Протягом першої зустрічі з майбутнім космонавтом Леонідом Каденюком у 1996 р. я була сильно вражена його бажанням не лише ознайомитися із завданнями експерименту, але й з науковою базою, досягненнями та ідеями в біології, на яких грунтується експеримент. Слід нагадати, що український космонавт-дослідник мав виконувати всю серію експериментів з космічної біології, яка дістала назву Спільний Українсько-американський експеримент, CYAE (Collaborative Ukrainian Experiment, CUE) з метою досліджень впливу мікрогравітації на ріст і розвиток рослин, що була рекомендована на основі даних експертизи НАСА досягнень в галузі космічної біології рослин в Національній академії наук України та підготовлених спільних пропозицій ученими України та США. В експерименті брали участь шість установ Національної академії наук України — ботаніки, фізіології рослин і генетики, молекулярної біології та генетики, екології Карпат, мікробіології та вірусології, Національний ботанічний сад, з боку США — п'ять університетів штатів Канзас, Північна Кароліна, Огайо, Луїзіана, Кентуккі та Космічний центр ім. Дж. Кеннеді.

Леонід Каденюк прослухав цикл лекцій, організованих для нього в інститутах НАН України. Після цього почалися практичні заняття, метою яких було навчити Л. Каденюка визначати стан приймочки, наявність на ній секрету для проведення запилення, збирати пилок, легко визначати його достатню кількість на приймочці. Ці практичні заняття продовжувалися в 1997 р. в університетах США та в космічному центрі ім. Кеннеді. У США Леонід Каденюк цілком оволодів навичками роботи з установками для вирощування рослин, маніпуляції з ними, а також пристроями для хімічної фіксації та заморожування зразків. Я згадую, як Леонід телефонував мені декілька разів із США, щоб точніше визначити деякі деталі процесу запилення квіток, оскільки він хвилювався, що після запилення, яке він проводив, кількість зав'язей не досягала 100 %. В результаті глибокого та досконалого знайомства з теорією та практикою біології рослин Леонід Каденюк блискуче виконав всі завдання на орбіті за протоколом експерименту, завдяки чому вчені одержали бездоганний матеріал для наступних досліджень в лабораторіях України та США. Одержано принципово нову наукову інформацію та оригінальні концепції й гіпотези, розроблення яких стало значним внеском у космічну біологію та позначилося на її подальшому розвитку.

Леонід Каденюк, перебуваючи на орбіті, під час відеомосту також спілкувався з учнями України та США. У космічному центрі ім. Кеннеді ми мали можливість слухати це спілкування та із задоволенням і хвилюванням відзначали не лише його змістовні відповіді школярам, але й гарну англійську мову. Після повернення до Києва Л. Каденюк систематично брав участь у зібраннях, присвячених СУАЕ. Мої теплі зустрічі з Л. Каденюком продовжувалися, і я завжди відчувала його дружнє відношення до мене та інтерес до справ у космічній біології.

Свої враження від професійної діяльності космонавта-дослідника та перебування в безмежному космічному просторі Леонід Каденюк висвітлив у трьох книгах, які є незабутніми спогадами про першого космонавта Української держави, світлої та надійної людини.

З глибоким сумом ми всі сприйняли звістку про передчасну смерть Леоніда Костянтиновича Каденюка, Героя України, першого космонавта України, гордість України, справжнього професіонала, людину честі, патріота, який вперше доставив на навколоземну орбіту «Кобзар» Шевченка. «Космічний політ справляє надзвичайно багато вражень. Але основне — це те, що все побачене, відчуте й пережите в Космосі змушує по-особливому сприймати життя на Землі. Адже там, у Космосі, коли космічний корабель облітає Землю всього за 90 хвилин, вона здається дуже маленькою і незахищеною, а атмосфера, фізичні властивості якої уможливлюють людське існування на Землі, — то надто тоненький прошарок навколо неї. Коли дивишся на Землю з Космосу — постає бажання дбати про неї, берегти її природу» — розповідав Леонід Каденюк про свій незабутній політ...

Ще 5 грудня 2017 року ми радо вітали Леоніда Костянтиновича на спільному засіданні Ради з космічних досліджень Національної академії наук України і Науково-технічної ради Державного космічного агентства України, де він і наші колеги згадували про українсько-американський науковий експеримент з космічної біології з вирощування рослин, який 20 років тому Леонід Костянтинович успішно провів на борту космічного корабля багаторазового використання «Колумбія». Завдяки його відповідальній роботі на орбіті вчені отримали принципово нову наукову інформацію, розробили на її основі оригінальні концепції, які стали вагомим внеском у світову космічну біологію та свідченням непересічності особистості нашого космонавта. Леонід Костянтинович приділяв багато часу роботі з молоддю, сприяв створенню Музею космонавтики в Чернівцях, на своїй Батьківщині...

Україна зазнала непоправної втрати. Висловлюємо щире співчуття родині Леоніда Костянтиновича, колегам і друзям.

> Редакційна колегія журналу «Космічна наука і технологія»

## REFERENCES

# as concerns with the Collaborative Ukrainian Experiments

#### Journal Articles:

Nedukha O.M., Leach J.E., Ryba-White M., Hilaire E., Guikema J., and Kordyum E.L. Effects of microgravity on the susceptibility of soybean to Phytophthora sojae. *Journal of Gravitational Physiology* **5**(1):143–144 (1998).

Adamchuk N.I., Mikhaylenko N.F., Zolotareva E.K., Hilaire E., and Guikema J.A. Spaceflight effects on structural and some biochemical parameters of Brassica rapa photosynthetic apparatus. *Journal of Gravitational Physiology* **6**(1):95– 96 (1999). Jiao, S., Hilaire E., Paulsen A.Q., and Guikema J.A. Ultrastructural observation of altered chloroplast morphology in space-grown Brassica rapa cotyledons. *Journal of Gravitational Physiology* **6**(1):93–94 (1999).

Kordyum E.L., Martin G.I., Zaslavsky V.A., Jiao S., Hilaire E., and Guikema J.A. DNA content and differentiation of root apical cells of Brassica rapa plants grown in microgravity. *Journal of Gravitational Physiology* **6**(1):119–120 (1999).

Nedukha O., Leach J., Kordyum E., Ryba-White M., Hilaire E., Guikema J., and Piastuch W. Root meristem ultrastructure of soybean seedlings infected with a pathogenic fungus in microgravity. *Journal of Gravitational Physiology* 6(1):125.126 (1999).

Volovik O.I., Kordyum E.L., and Guikema J.A. Some characteristics of photosynthetic apparatus under conditions of spaceflight. *Journal of Gravitational Physiology* **6**:27–128 (1999).

Kuang A., Xiao Y., McClure G., and Musgrave M. E. Influence of microgravity on ultrastructure and storage reserves in seeds of Brassica rapa L. *Annals of Botany* **85**(6): 851–859 (2000).

Kuang A., Popova A., Xiao Y., and Musgrave M. E. Pollination and embryo development in Brassica rapa L. in microgravity. *International Journal of Plant Science* **161**(2):203–211 (2000).

Leach J.E., Ryba-White M., Sun Q., Wu C.J., Hilaire E., Gartner C., Nedukha O., Kordyum E., Keck M., Leung H., and Guikema J.A. Plants, plant pathogens, and microgravity—a deadly trio. *Gravitational and Space Biology Bulletin*. **14**(2):15—23 (2001).

Kuang A., Popova A., McClure A. G., and Musgrave M. E. Dynamics of storage reserve deposition during Brassica rapa L. pollen and seed development in microgravity. *International Journal of Plant Science* **166**(1):85–96 (2005).

Levine H.G., Sharek J.A., Johnson K.M., Stryjewski E.C., Prima V., Martynenko O., and Piastuch W.C. Growth protocols for etiolated soybeans germinated within BRIC-60 canisters under spaceflight conditions. *Advances in Space Research* **26**(2): 311–314 (2000).

Musgrave M. E. Realizing the potential of rapid-cycling Brassica as a model system for use in plant biology research. *Journal of Plant Growth Regulation* **19**:314–325 (2000).

Kuznetsov O.A., Brown C.S., Levine H.G., Piastuch W.C., Sanwo M.M., and Hasenstein K.H. Composition and physical properties of starch in microgravity-grown plants. *Advances in Space Research* 28(4):651–658 (2001).

Musgrave, ME, Kuang, A. Reproduction during spaceflight by plants in the family Brassicaceae. *Journal of Gravitational Physiology* **8**(1):29–32 (2001).

Ryba-White M, Nedukha O., Hilaire E., Guikema J.A., Kordyum E., and Leach J.E. Growth in microgravity increases susceptibility of soybean to a fungal pathogen. *Plant Cell Physiology* **42**(6):657–64 (2001). Includes journal cover photo: http://pcp.oxfordjournals.org/content/vol42/issue6/index.dtl

Stout S.C., Porterfield D. M., Briarty L. G., Kuang and A., Musgrave M. E. Evidence of rootzone hypoxia in Brassica

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

rapa L. grown in microgravity. *International Journal of Plant Science* **162**:249–255 (2001).

Musgrave ME. Seeds in Space. *Seed Science Research* **12**:1–16 (2002).

Levine L.H., Levine H.G., Stryjewski E.C., Prima V. and Piastuch W.C. Effect of Microgravity on isoflavonoid metabolism in etiolated soybean seedlings. *J. Gravitational Physiology* **8**(2):21–28 (2002).

Adamchuk N.I., Guikema J.A., Jialo S., and Hilaire E. State of Brassica rapa photosynthetic membranes in microgravity. *Journal of Gravitational Physiology* **9**(1): 229–230 (2002).

Kochubey S.M., Adamchuk N.I., Kordyum E.L., Guikema J.A. Microgravity affects the photosynthetic apparatus of Brassica rapa L. *Plant Biosystems* **38** (1), 1–9 (2003).

Jiao S., Hilaire E., Paulsen A.Q., and Guikema J. A. Brassica rapa plants adapted to microgravity with reduced photosystem I and its photochemical activity. *Physiologia Plantarum* **122**(2):281–290 (2004).

Levine H.G. and Piastuch W.C. Growth patterns for etiolated soybeans germinated under spaceflight conditions. *Advances in Space Research* **36**(7):1237–1243 (2005).

Adamchuk N.I., Povchan M.F. Influence of clinorotation on the mesophyll and Rubisco. *Acta fytotechnica et zootechnica*, **2**, 54–56 (2007).

Адамчук-Чала Н.І., Яценко В.О., Гніденко В.В., Пашенковська І.С. Рослини в космосі: виміри, моделювання та експерименти. Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки, Вип. 3,71—75 (2014).

Яценко В.О., Петрович В.П., Адамчук Н.І., Требіна Н.М. Програмне забезпечення для аналізу та оцінювання хлорофілу в рослинності. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Фізикоматематичні науки. №4(16), 71—75 (2016).

#### **Proceedings and Other Publications:**

Adamchuk N.I., Guikema J.A., Jialo S.H. State of Brassica rapa photosynthetic membranes in microgravity. In: Life in Space for Life on Earth, 8th Europian Symposium on Life Sciences Research in Space (2–7 June 2002, Stockholm): Proceedings, P. 311–312 (2002).

Dreschel, T. W., P. H. Williams, V. I. Nazarenko, and P. V. Chetirkin. 1997. The Collaborative Ukrainian Experiment (CUE): Opportunities for Collaboration in Science Education and Research. Proceedings 34th Annual Space Congress, Session IID, Paper #6.

Dreschel, T. W., P. H. Williams, V. I. Nazarenko, and P. V. Chetirkin. 1998. A Report on the Collaborative Ukrainian Experiment-Teachers and Students Investigating Plants in Space. Proceedings 35th Annual Space Congress, Session IIID, Paper #4.

Dreschel, T. W. 1999. Science Communication for the Life Sciences at Kennedy Space Center. Proceedings 36th Annual Space Congress, Session IID, Paper #1. Dreschel, T. W., P.V. Chetirkin, S. Behel, and V. Nazarenko. 2001. Collaborative Ukrainian Experiment-Science and Technology Exchange for Students (CUE-STEPS). Proceedings 38th Annual Space Congress, Session IIC, Paper #3.

Dreschel, T. W., L. A. Lichtenberger, P. V. Chetirkin, L. C. Garner, and J. R. Barfus and V. I. Nazarenko. 2005. International Space Education Outreach: Taking Exploration to the Global Classroom. Paper number 05ICES-62, The International Conference on Environmental Systems, Rome, Italy, July 2005.

#### **Book and Book Chapters:**

Musgrave, M. E. and Kuang A. 2003. Plant Reproductive Development during Spaceflight. In: H-J. Marthy (ed.), Advances in Space Biology and Medicine. Vol. 9:1–23. Elsevier.

Kordyum E., Chapman D. Plants in space. Kyiv: Akademperiodyka, 214 p. (2007)

#### Abstracts:

Адамчук Н.И. Влияние горизонтального клиностатирования на структурно-функциональную организацию фотосинтетического аппарата высших растений. Космическая биология и авиакосмическая медицина. XI Междунар. конф. (22—26 июня 1998 г, Москва): Тезисы докл. Москва, Российская Федерация, т. 1., 13—15 (1998).

Адамчук Н.І. Структурно-функціональні особливості фотосинтетичного апарату рослин при зміні сили тяжіння. Абстракти в «Людина і космос», *Всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція* (19—23 травня, 1999 р., Дніпропетровськ), Дніпропетровськ, С. 209 (1999).

Адамчук Н.І., Джиало С., Хіларі Є., Гайкема Дж. Адаптаційні перебудови фотомембран листків паростків Brassica гара, що зростали в умовах мікрогравітації. *XI* з*їзд Українського ботанічного товариства* (вересень 2001 р., Харків): Тези доп., С. 4—5 (2001).

Adamchuk N.I. Structural and functional organization of mesophyll cells of Brassica rapa plants grown in microgravity. *Abstract in: Gravitational and space biology bulletin*, v. 12, N1, oct. 1998, P. 46.

Adamchuk N.I. Structural organization of plant leaves an mesophyll cells in B. rapa. B-PAC experiment. *Science Milestones*, N3, P. 5 (1998).

Adamchuk N.I., Kordyum E.L. Structure of photosynthetic apparatus in higher plants in microgravity. *Photosynthesis and Crop Production, International conference* (7–11 October 2002, Kyiv): Abstracts, Kyiv, P. 113 (2002).

Billings, L., T. Dreschel, M. Montrose, and P. Williams. 1996. "Fast Plants" in Space and in School: NASA Educational Activity for the U.S.-Ukraine Mission. *Abstract #96-LS-15, The 1996 AIAA Life Sciences and Space Medicine Conf. Book of Abstracts,* pp 30–31.

Dreschel, T.W., P.V. Chetirkin, S. Behel, and V.I. Nazarenko. 2001. Collaborative Ukrainian Experiment-Science and

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24. № 1

Technology Exchange Program for Students (CUE-STEPS). *Abstract to The 38th Annual Space Congress*, May, 2001.

Dreschel, T.W., P.V. Chetirkin, L.C. Garner, and V.I. Nazarenko. 2005. International Space Education Outreach: Taking Exploration to the Global Classroom. *Abstract at The 35th International Conf. on Environmental Systems (ICES) and the 8th European Symposium on Space Environmental Control Systems (ESSECS)*, Rome, Italy.

Kuang, A., A. Popova, Y. Xiao, and M.E. Musgrave. 1998. Pollination and embryo development in Brassica rapa on STS-87. *Gravitational and Space Biology Bulletin* 12:77.

Kuang, A., Y. Xiao, and M. E. Musgrave. 1998. Reproduction on orbit by plants in the family Brassicaceae. *COSPAR*  Abstracts, July 12-19, Nagoya, Japan. p. 380.

Kuang, A, and Musgrave, M.E. 2000. Changes in cotyledon cell ultrastructure during Brassica rapa seed development in microgravity. *Gravitational and Space Biology Bulletin* 14:34.

Porterfield, D.M., O. Monje, G.W. Stutte, and M.E. Musgrave. 2000. Rootzone hypoxic responses result from inhibition of gravity dependent oxygen transport in microgravity. *Gravitational and Space Biology Bulletin* 14:50.

Williams, P.H., C. M. Williams, C. M. Roden, T. Dreschel, and M. E. Musgrave. 1996. CUE-TSIPS, Cooperative Ukrainian Experiment - Teachers and Students Investigating Plants in Space. *Gravitational and Space Biology Bulletin* 10(1): 13 (abstr.)



Леонід Каденюк — астронавт космічної місії STS-87. 1997 р.



Екіпаж космічної місії STS-87, 19 листопада — 5 грудня 1997 р.



Леонід Каденюк під час спільного українсько-американського експерименту з космічної біології на ККБВ «Колумбія», 1 9 листопада — 5 грудня 1997 р.



Анатолій Арцебарський, Віталій Жолобов, Роман Попович, Леонід Каденюк під час зустрічі в Українському центрі в Москві, 1999 р.



Олег Петров і Леонід Каденюк у Національному музеї Тараса Шевченка в Каневі під час дарування «Кобзаря», що побував у космосі, 22 травня 2014 р.



Спільне засідання Ради з космічних досліджень НАН України і Науково-технічної ради ДКА України, присвячене 20-річчю польоту Леоніда Каденюка у космос. Київ, 5 грудня 2017 р. На фото: Леонід Каденюк під час виступу; академік НАН України Я. С. Яцків вручає Почесну грамоту Президії НАН України і ЦК профспілки працівників НАН України; радник Голови ДКА України Е. І. Кузнєцов вручає Подяку ДКА України професору В. Я. Березовському; генеральний директор телекомпанії «Міжнародний Слов'янський Канал» Валерія Іваненко і Леонід Каденюк



Леонід Каденюк під час урочистостей з нагоди 20-річчя його польоту у космос: у Чернігівському історичному музеї імені В. В. Тарновського, 15 грудня 2017 р.; у Національному університеті «Львівська політехніка», 27 грудня 2017 р.

**БАННІКОВА Олена Юріївна** — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, кафедра астрономії та космічної інформатики Національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрям науки — астрономія.

**БУБНОВ Ігор Миколайович** — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

ВАВИЛОВА Ірина Борисівна — завідувач відділу позагалактичної астрономії та астроінформатики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, доцент. Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — позагалактична астрономія, космічні дослідження, історія науки.

**ВАВРІВ Дмитро Михайлович** — завідувач відділу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіофізика.

ВАЙДІН Горден — співробітник Дослідницької лабораторії Армії США, доктор філософії.

Напрям науки — оптика.

**ГАЛУШКО Володимир Григорович** — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізикоматематичних наук.

Напрям науки — радіофізика.

**ЕЛЬКАДІ Махмуд Мохамед Реда Ельсаєд** — аспірант кафедри технології виробництва фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Напрям науки — матеріалознавство, теплозахисні матеріали.

**ЄРІН Сергій Миколайович** — молодший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ЗАРКА Філіп — директор з досліджень CNRS, доктор філософії.

Напрям науки — радіоастрономія.

ЗАХАРЕНКО В'ячеслав Володимирович — директор Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

КАЙДАШ Вадим Григорович — директор Інституту астрономії Національного університету імені В. Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрономія.

КОНОВАЛЕНКО Олександр Олександрович — заступник директора Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

КОРОХІН Віктор Валентинович — провідний науковий співробітник Інституту астрономії Національного університету імені В. Н. Каразіна, кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — астрономія.

**КРИСАНОВА Наталія Валеріївна** — старший науковий співробітник відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біохімія, нейрохімія, мембранологія, нанотехнологія, космічна біологія.

**ЛИТВИНЕНКО Леонід Миколайович** — радник директора Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

**РУКЕР Гельмут** — радник директора Інституту космічних досліджень (Грац), доктор наук в галузі геофізики.

Напрям науки — космічна фізика плазми, магнітосфери, планетарне та сонячне випромінювання.

САНІН Анатолій Федорович — Завідувач кафедри технології виробництва Фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Лауреат Державної премії України, нагороджений знаком «Почесний працівник космічної галузі».

Напрям науки — Матеріалознавство та новітні технології виробництва перспективних матеріалів і виробів на їхній основі для об'єктів ракетно-космічної, авіаційної техніки і їх складових частин.

СТАНІСЛАВСЬКИЙ Олександр Олександрович — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

**СТАНКЕВИЧ Дмитро Геннадійович** — доцент кафедри астрономії та космічної інформатики Інституту астрономії Національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрям науки — астрономія.

**СТЕПКІН Сергій Васильович** — науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

**ТОКАРСЬКИЙ Петро Львович** — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор технічних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

УЛЬЯНОВ Олег Михайлович — завідувач відділу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

ХОРОЛЬСЬКИЙ Михайло Степанович — доцент кафедри технології виробництва фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету ім. О. Гончара, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук. Заслужений працівник промисловості України, Лауреат Державної премії СРСР, нагороджений орденами: «Трудового червоного прапора», «За заслуги» ІІІ ступеня, медаллю «Ветеран праці», медаллю «За заслуги перед містом», має три галузеві нагороди, 12 іміджевих нагород і одну нагороду органів місцевого самоврядування.

Напрям науки — матеріалознавство, розробка та дослідження еластомерних матеріалів і виробів на їхній основі.

**ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович** — Заслужений професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1989 г.), двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — космічна радіофізика, фізика геокосмосу, космічна екологія та космічна погода.

ШКУРАТОВ Юрій Григорович — завідувач кафедри астрономії та космічної інформатики Національного університету імені В. Н. Каразіна, член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фізикоматематичних наук.

Напрям науки — астрономія.

**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.

ЖУРНАЛ «КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ» є визнаним науково-практичним загальноакадемічним виданням в Україні, що висвітлює найширші аспекти космічної діяльності у державі та за кордоном. Журнал розрахований на фахівців у галузі космічної науки і техніки, на тих, хто займається використанням космічних технологій в різних галузях народного господарства, а також на закордонних читачів, які бажають ознайомитися з досягненнями космічної галузі України. У журналі публікуються оглядові та оригінальні статті з різних розділів космічної науки, техніки та технології: історичні, соціальні та організаційні аспекти проблеми дослідження космосу; космічні носії та апарати; системи керування космічними носіями та апаратами; космічний зв'язок та інформаційні системи; дослідження Землі з космосу; космічна фізика (навколоземний космічний простір); космічна астрономія та астрофізика; хімічні, фізичні та біологічні процеси в космосі; космічні конструкції, споруди та матеріали, а також різні повідомлення, звіти та рекламні матеріали.

Авторами та читачами журналу є видні діячі та спеціалісти космічної промисловості, вчені-теоретики та практики, що працюють у галузях космічної фізики, хімії, астрономії, матеріалознавства, машинобудування, навігації, біології тощо. Журнал корисний для науковців, інженерів, аспірантів та студентів вишів, його включено до переліку наукових фахових видань, у яких можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт з фізико-математичних та технічних наук. Редколегія спрямовує зусилля на підвищення рівня висвітлення результатів робіт українських вчених і конструкторів ракетно-космічної техніки у світових наукометричних базах.

Журнал виходить 6 разів на рік. З поточним номером чи архівом за минулі роки, а також правилами оформлення рукописів можна ознайомитись на сайті **space**scitechjournal.org.ua

Кожен рукопис рецензується відомими фахівцями відповідної галузі. На основі висновків рецензентів редколегія робить висновок про можливість публікації. **При подачі рукопису** автор надсилає у редакцію дві тверді копії оригіналу, електронні копії, направлення на бланку установи та Ліцензійну угоду (бланк угоди є на сайті **space-scitechjournal.org.ua**) на адресу:

вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143 Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України Редакція КНІТ

Рукописи подаються українською, російською або англійською мовою, кожен рукопис супроводжується трьома резюме (українською, російською та англійською мовами). Послідовність подачі матеріалу така:

- Номер УДК
- Ініціали та прізвища авторів
- Установи, де працюють автори
- Електронні адреси всіх авторів, якщо є
- Назва рукопису
- Резюме мовою рукопису
- Ключові слова мовою рукопису
- Текст рукопису
- Список літератури, упорядкований у алфавітному порядку
- References (див. сайт)
- Два резюме додатковими мовами. Кожне резюме повинне містити: список авторів, список установ, де вони працюють, назву рукопису, текст резюме, ключові слова.

Вимоги до набору тесту, формул, таблиць, рисунків та іншого ілюстративного матеріалу є загальноприйнятими та типовими для наукових журналів. Більш детально з принципами оформлення рукопису можна познайомитись на сайті журналу **space-scitechjournal.org.ua**.

Редакція e-mails: reda@mao.kiev.ua kfnt-knit@ukr.net Телефон: 380 44 526 47 63 Факс: 380 44 526 21 47