

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

# **3MICT**

### Історія космічних досліджень

Лялько В. І., Попов М. О., Федоровський О. Д., Філіпович В. Є., Єсипович С. М., Седлерова О. В. До 25-річчя від дня заснування Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

### Дослідження Землі з космосу

Федоровский А. Д., Хижняк А. В., Дьяченко Т. Н., Якимчук В. Г., Подгорняк Д. Л., Суханов К. Ю., Томченко О. В. Космический мониторинг водных потоков устьевых областей рек (на примере Днепра и Дуная)

Бутко І. М., Мамарєв В. М., Ожінський В. В., Харченко С. П. Інформація дистанційного зондування Землі в системі державного управління: сучасний стан та перспективи

### Космічні матеріали та технології

*Гусарова И. А.* Высокотемпературный теплоизоляционный материал на основе керамических волокон

## Науки про життя в космосі

Пастухов А. О., Дударенко М. В., Галкін М. О., Крисанова Н. В., Назарова А. Г., Позднякова Н. Г., Борисова Т. О. Створення вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу та оцінка його впливу на транспорт нейромедіаторів нервовими терміналями головного мозку щурів

# CONTENTS

### History of Space Research

3 Lyalko V. I., Popov M. A., Fedorovskyi A. D., Filipovich V. E., Esipovich S. M., Sedlerova O. V. On the 25th anniversary of foundation of the state institute «Scientific centre for aerospace research of the Earth of the Institute of geological sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine»

## Study of the Earth from Space

- 11 Fedorovskyi A. D., Khyzhniak A. V., Diachenko T. N., Yakimchuk V. G., Pidhorniak D. L., Sukhanov K. Yu., Tomchenko O. V. Space monitoring of water stream in estuarial areas (by the example of the Dnieper and the Danube)
- 17 Butko I. M., Mamarev V. M., Ozhynsky V. V., Kharchenko S. P. Information of the Earth's remote sensing in the system of the state governing: current status and perspectives

## **Space Materials and Technologies**

24 *Gusarova I. A.* High-temperature heat-insulation material on the basis of ceramic fibers

### Space Life Sciences

32 Pastukhov A. O., Dudarenko M. V., Galkin M. O., Krisanova N. V., Nazarova A. G., Pozdnyakova N. G., Borisova T. O. Development of carbon-containing martian dust analogue and assessment of its effects on the key characteristics of the synaptic neurotransmission in rat brain nerve terminals

#### Космічна й атмосферна фізика

*Могильчак В. Ю., Міліневський Г. П.* Варіації загального вмісту озону в атмосфері над територією України

*Лизунов Г. В.* Комментарий на статью О. Ф. Тырнова, Ю. П. Федоренко, В. Л. Дорохова «Пространственновременная динамика перемещающихся ионосферных возмущений»

Федоренко Ю. П. Ответ на комментарий Г.В. Лизунова по статье «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений»

## Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень

Корепанов В. Є. Робоча зустріч делегацій космічних агенцій України та Республіки Польща

### Наші автори

### Space and Atmospheric Physics

- **41** *Mogylchak V. Y., Milinevsky G. P. Variations of total ozone* in the atmosphere over the territory of Ukraine
- **48** *Lizunov G. V.* Commentary on the paper "Spatio-temporal dynamics of traveling ionospheric disturbances" by Tyrnov O. F., Fedorenko Yu. P., Dorohov V. L.
- **52** *Fedorenko Yu.* P. Response of the authors to the commentary by G. V. Lizunov on our paper "Spatio-temporal dynamics of traveling ionospheric disturbances"

### 68 Social Sciences in Space Exploration

*Korepanov V. E.* Workshop of the delegations of space agencies of Ukraine and Poland

### 70 Our authors

На першій сторінці обкладинки — Космічні знімки гирла р. Дніпро і Кілійської дельти р. Дунай в 1986 р. («Ландсат-5») та у 2015 р. («Ландсат-8»)

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 31.07.2017. Формат 84×108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 7,56. Обл.-вид. арк. 7,94. Тираж 100 прим. Зам. № 4974.

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/knit2017.02.003

УДК (55:528.8):061.6(477)

## В. І. Лялько, М. О. Попов, О. Д. Федоровський, В. Є. Філіпович, С. М. Єсипович, О. В. Седлерова

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

# ДО 25-річчя ВІД ДНЯ ЗАСНУВАННЯ ДЕРЖАВНОЇ УСТАНОВИ «НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

Державну установу «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» (ЦАКДЗ, або Центр) як самостійну юридичну установу було створено в 1992 р. (Постанова Президії АН України від 20.05.1992 р., № 150) на базі відділу тепломасопереносу в земній корі Інституту геологічних наук НАН України та Київського науково-дослідного інституту космоаерометодів тодішнього Міністерства нафтової і газової промисловості СРСР та АН СРСР.

Упродовж майже 25 років директором ЦАКДЗ незмінно був один з його засновників, академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України Вадим Іванович Лялько. Сьогодні В. І. Лялько є Почесним директором Центру.

У грудні 2016 р. директором Центру обрано доктора технічних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки України М. О. Попова. Учений секретар — кандидат геологічних наук О. В. Седлерова.

Організаційно ЦАКДЗ має у своїй структурі п'ять відділів:

• енергомасообміну у геосистемах,

 геоінформаційних технологій у дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ),

- аерокосмічних досліджень у геології,
- системного аналізу,
- аерокосмічних досліджень в геоекології.

У складі Центру працює понад 80 співробітників, з них дві третини — науковці, серед яких академік НАН України, член-кореспондент НАН України, вісім докторів наук, 22 кандидати (геологічних, географічних, фізико-математичних, технічних і біологічних) наук, навчаються шість аспірантів.

У Центрі розвивається наукова школа «Енергомасообмін в геосистемах». Досліджуються процеси енергомасообміну в геосистемах та їхній вплив на фізико-хімічні та біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів. Дослідження мають фундаментальний та водночас прикладний характер. Сформовані і плідно працюють наукові групи системного аналізу і геоінформаційних технологій в ДЗЗ.

Головне завдання Центру — проведення фундаментальних та прикладних наукових досліджень Землі дистанційними методами з метою одержання нових наукових знань і практичного

<sup>©</sup> В. І. ЛЯЛЬКО, М. О. ПОПОВ, О. Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ,

В. Є. ФІЛІПОВИЧ, С. М. ЄСИПОВИЧ, О. В. СЕДЛЕРОВА, 2017

впровадження цих знань в інтересах інноваційного розвитку країни та задоволення економічних, соціальних та оборонних потреб.

## Основні наукові напрями та завдання Центру такі:

• удосконалення теоретико-методичних основ аерокосмічного моніторингу довкілля, створення і дослідження фізико-математичних моделей генерування, відбиття та розсіювання електромагнітного випромінювання земними утвореннями (рослинність, ґрунт, вода) та антропогенними об'єктами;

розроблення методів і технологій аерокосмічного моніторингу екологічного стану природного середовища, дистанційного вирішення природоресурсних завдань, а також завдань подвійного призначення, спостереження за глобальними змінами у геосфері (пошуки корисних копалин, кліматичні зміни, стан та зміни лісів, опустелювання тощо);

• розроблення методів і технологій аерокосмічного агромоніторингу з оцінюванням стану сільськогосподарських культур та прогнозуванням урожайності, дистанційного спостереження за поновлюваними природними ресурсами (ґрунти, ліси, водойми);

 обґрунтування вимог до технічних засобів ДЗЗ, розроблення методів калібрування бортових сенсорів і валідації супутникових даних і технологій;

• створення вітчизняної нормативно-понятійної бази ДЗЗ з гармонізацією її до відповідних міжнародних норм і стандартів;

• міжнародна кооперація досліджень з ДЗЗ з метою залучення передового зарубіжного досвіду, апаратури і технологій для потреб економіки та охорони навколишнього середовища в Україні.

Основні завдання наукових досліджень Центру.

1. Оцінювання та менеджмент природних ресурсів:

— деталізація геологічної структури територій (вивчення активних екзогенних процесів, виявлення та локалізація активних розломних зон, похованих плікативних структур тощо);

 оцінювання територій і шельфової зони з метою пошуку родовищ нафти та газу;

— оцінювання екологічного стану та космічний моніторинг територій видобування корисних копалин (бурштину, ільменіту, вуглеводнів та ін.);

— визначення вологості ґрунтів та рівня ґрунтових вод, пошук підземних водних резервуарів;

— оцінювання стану та картування лісових угідь;

 — розробка дистанційної основи та складання на її підґрунті тематичних карт за Державною програмою ГДП-200.

2. Екологічний моніторинг навколишнього середовища:

 — оцінювання та прогнозування кліматичних змін і парникового ефекту на підставі даних ДЗЗ та полігонних досліджень;

— оцінювання морських акваторій і внутрішніх водоймищ — швидке виявлення розливів нафти і нафтопродуктів на водній поверхні, аналіз еколого-санітарного стану та якості води у водоймищах, виявлення промислових забруднень, контроль розподілу суспендованих речовин, зелених водоростей та ін.;

— оперативний моніторинг паводків, підтоплень, заболочування, пожеж на торфовищах, лісових пожеж та інших природних катаклізмів;

 – оцінювання територій, забруднених важкими металами, радіонуклідами, пестицидами та іншими токсичними речовинами;

— вивчення міських агломерацій — динаміка розвитку і забудови міста, антропогенний вплив промисловості на довкілля, оцінювання розвитку «теплових островів» та їхній вплив на якість життя.

3. Застосування даних ДЗЗ у сільському господарстві:

— інвентаризація посівів;

 — оцінювання стану сільськогосподарських угідь — фенологічні спостереження, забезпеченість посівів добривом, вологою, визначення біомаси та продуктивності;

прогнозування врожаю;

— аналіз параметрів стану ґрунтів.

4. Обгрунтування складу і характеристик бортових засобів ДЗЗ, оцінювання ефективності ДЗЗ-технологій на основі методів системного аналізу:

 обґрунтування складу бортового навантаження супутників ДЗЗ;

 – оцінювання ефективності бортових видових технічних засобів ДЗЗ;  — розроблення методів калібрування бортових сенсорів і валідації супутникових даних і технологій;

 – системний аналіз ефективності функціонування системи ДЗЗ (з урахуванням космічних апаратів і наземної інфраструктури).

5. Розроблення алгоритмів і програмного забезпечення для створення технологій подвійного використання.

У Центрі розроблено нові ефективні космічні методи й технології для вирішення ряду актуальних для України завдань раціонального природокористування, зокрема для:

 пошуків нафтогазових покладів на суходолі та шельфі, що дозволило майже вдвічі підвищити результативність відповідних робіт. Цю технологію практично апробовано не лише в Україні, але й у Російській Федерації, Туркменистані та Об'єднаних Арабських Еміратах;

• оцінювання стану та врожайності агрокультур;

• аналізу екологічного стану територій і акваторій у режимі моніторингу;

• космічного моніторингу тепловтрат на урбанізованих територіях;

• космічного моніторингу (аудиту) балансу парникових газів.

Відділ енергомасообміну в геосистемах. Завідувач відділу — академік НАН України В. І. Лялько. До 1992 р. відділ був підрозділом Інституту геологічних наук НАН України і мав назву «Відділ тепломасопереносу в земній корі». Його було створено з метою проведення науково-дослідних робіт з вивчення енергомасообміну в геосистемах на основі комп'ютерного моделювання сучасних супутникових технологій; формування і реалізації єдиної наукової та науково-технічної політики Центру, вирішення актуальних наукових проблем, підвищення його наукового потенціалу. У відділі виконано значний обсяг теоретико-методичних і практичних досліджень: створено моделі процесів формування ресурсів та гідрогеологічних умов охорони підземних вод; розроблено методи розрахунку тепло- і масопереносу в земній корі; обґрунтовано доцільність захоронення токсичних промислових стоків у надра; розроблено критерії геотермічних пошуків корисних копалин, у тому числі підземних вод та вуглеводневої сировини; узагальнено теоретико-методичні засади застосування матеріалів космічного знімання для вирішення актуальних завдань раціонального природокористування, наприклад: пошуків нафтогазових покладів на шельфі, оцінювання фітосанітарного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування стану й урожайності зернових культур та екологічної ситуації в екосистемах. Розроблено та застосовано нові ефективні методи й технології синергетичної інтерпретації матеріалів сучасних аерокосмічних гіперспектральних знімань. Уперше на основі матеріалів багатоспектральних космічних знімань експериментально визначено основні балансові складники формування парникового ефекту у межах території України з метою виявлення кількісних показників для обґрунтування виділених нашій державі квот парникових газів відповідно до Кіотського протоколу. Передбачено довготермінові сценарії кліматичних та екологічних змін на регіональному і локальному рівнях. Визначено стратегії адаптації, зокрема у зв'язку з прогнозованою ескалацією природних катастроф.

Грунтуючись на вказаних теоретико-методичних дослідженнях, відділ впровадив багато результатів у вигляді укладених договорів на виконання певних робіт із низкою виробничих організацій, Міністерством екології та природних ресурсів України, Державною службою України з надзвичайних ситуацій, НАК «Нафтогаз України», з державними адміністраціями Києва, Херсона тощо.

Відділ геоінформаційних технологій у дистанційному зондуванні Землі. Завідувач відділу — доктор технічних наук М. О. Попов. Відділ створено у 2004 р. з метою інформаційно-методичного та алгоритмічного забезпечення робіт із ДЗЗ.

Основні напрями досліджень — інформаційнометодичне та алгоритмічне забезпечення робіт із ДЗЗ, а саме: методичне й алгоритмічне забезпечення інтерпретації аерокосмічних зображень; обгрунтування вимог щодо обліку перспективних бортових комплексів ДЗЗ; розроблення методів оцінювання якості та інформаційних властивостей цифрових багато- і гіперспектральних аерокосмічних зображень; опрацювання методології тестування супутникових технологій на основі геоінформаційних технологій і польових полігонних вимірювань; створення вітчизняної понятійно-нормативної бази у галузі ДЗЗ, її вдосконалення і гармонізація з відповідними міжнародними стандартами та нормами.

Учені відділу розробляють теоретико-методичні основи оброблення та аналізу багато- і гіперспектральних аерокосмічних зображень для вирішення різноманітних тематичних завдань ДЗЗ, нові ефективні алгоритми автоматизованої інтерпретації аерокосмічних зображень.

Результати проведених досліджень впроваджуються при вирішенні задач реальної економіки та оборонної тематики.

Відділ аерокосмічних досліджень у геології. Завідувач відділу — доктор геологічних наук С. М. Єсипович. Підрозділ сформовано на базі колишнього Київського відділу Інституту геології і розвідки горючих копалин Міністерства нафтової і газової промисловості СРСР (1976 р.). На початку 1992 р. він трансформувався в Інститут космоаерометодів, який у травні 1992 р. увійшов до складу ЦАКДЗ. Науковий напрям відділу розроблення методологій вирішення геологічних завдань на базі широкого використання матеріалів аерокосмічних зйомок у комплексі з геолого-геофізичними, геохімічними та іншими даними.

За допомогою матеріалів космічного знімання створено нові технології пошуку покладів вуглеводнів на суходолі та шельфі; апробовано супутникову технологію прогнозування покладів нафти і газу в межах Дніпровсько-Донецької западини, а на окремих її нафтогазопошукових площах оцінено перспективи нафтогазоносності. Результати апробації демонструють високу достовірність цієї технології і відкривають перспективи для прогнозування нових родовищ вуглеводнів, що дозволить значною мірою вирішити паливно-енергетичну проблему України, використовуючи власну сировинну базу. Застосування зазначеної технології дає змогу підвищити геологічну й економічну ефективність геологорозвідувальних робіт щодо виявлення покладів нафти і газу, збільшити обсяг приросту запасів вуглеводневої сировини на фоні зниження фінансових витрат. За допомогою дистанційних методів розроблено методику аналізу нафтогазового потенціалу шельфу Чорного моря; здійснено рейтингове оцінювання нафтогазоперспективних об'єктів на шельфі, визначено структурно-геоморфологічні та геолого-геофізичні критерії для північно-західного шельфу Чорного та акваторії Азовського морів. Створено модернізований комплекс методів прогнозування нафтогазоперспективних об'єктів Дніпровсько-Донецької западини, який включає регіональний, зональний і детальний рівні, кореляцію поверхневих і глибинних аномалій.

**Відділ системного аналізу.** Завідувач відділу — член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський. Підрозділ створено у 2002 р. з метою проведення науково-дослідних робіт у напрямі наукового обґрунтування і впровадження методів системного аналізу для вирішення геоекологічних і природоресурсних завдань на основі аерокосмічної інформації ДЗЗ.

Основні напрями досліджень — виконання науково-дослідних робіт, передбачених державними і відомчими замовленнями; фундаментальних, пошукових та прикладних науково-дослідних робіт за такими спрямуваннями: розроблення наукових основ системного моделювання процесу одержання інформації космічними системами ДЗЗ, визначення їхньої оптимальної структури, параметрів та ефективності використання; опрацювання системної методології розвитку та підвищення ефективності космічного геомоніторингу для вирішення ресурсних і екологічних завдань природокористування.

У відділі створено наукові основи для моделювання процесу одержання інформації космічними системами ДЗЗ, визначено їхню оптимальну структуру, параметри та ефективність використання. Сформовано системну методологію розвитку та підвищення ефективності аерокосмічного геомоніторингу для вирішення проблем природокористування у процесі збільшення обсягу виконуваних тематичних завдань (зростання ризику надзвичайних ситуацій, розширення пошуку корисних копалин, аграрний комплекс, сталий розвиток міських агломерацій, якість води та водопостачання, екологічний стан довкілля, оборонний комплекс) та вдосконалення аерокосмічних систем ДЗЗ.

Відділ аерокосмічних досліджень у геоекології. Завідувач відділу — кандидат геологічних наук В. Є. Філіпович. Підрозділ було засновано у 1992 р. з метою організації і проведення науково-дослідних робіт у напрямі розроблення теорії та методів використання матеріалів багатоспектрального аеро- і космічного знімання для вирішення геоекологічних проблем. Основними завданнями та функціями відділу є створення нових методів і технологій комп'ютерного оброблення та інтерпретації аерокосмічних зображень для вирішення природоохоронних геоекологічних проблем, розроблення методології екологічного моніторингу в умовах сучасної трансформації урбанізованих територій на основі новітніх супутникових технологій ДЗЗ.

У відділі опрацьовано методичні принципи і технології використання матеріалів дистанційної інформації під час виконання геологознімальних робіт в Україні; запропоновано, на основі використання космічних даних, модернізацію методики оцінки шкоди, нанесеної державі внаслідок нелегального видобування бурштину. На основі дистанційних даних побудовано просторово-часові моделі підтоплення територій ґрунтовими водами в умовах міських агломерацій; за допомогою наземного спектрометрування та використання матеріалів ДЗЗ розроблено методичні прийоми виявлення техногенного забруднення урбанізованих територій важкими металами, а також джерел забруднень водного середовища. Створено методичні основи оцінювання геоекологічного стану промислових центрів (для Нікополя, Борислава, Києва, Кривого Рогу, Запоріжжя, Херсону, Миколаєва, Маріуполя). На основі розробленої геоінформаційної системи (ГІС), використання космічної інформації, аналізу цифрових моделей рельєфу та геолого-геоморфологічних даних дано обґрунтування прогнозу розвитку зсувонебезпечних процесів на окремих ділянках Придніпровської зсувної зони м. Київ. Розроблено методику аналізу теплового поля урбанізованих територій за даними космічної зйомки та наземних термометричних досліджень (на прикладі м. Київ).

Розроблено методичні основи застосування космічних даних у тепловому діапазоні для оцінки і прогнозування реакції міського середовища на зміни клімату. Створено просторово-часові ряди теплового поля м. Київ, що дозволяє у моніторинговому режимі аналізувати динаміку теплового навантаження на місто, визначати ділянки з підвищеним тепловим забрудненням, проводити районування території міста за ступенем комфортності проживання населення, та дано рекомендації щодо прийняття управлінських рішень з метою поліпшення містобудівного планування. Розроблено методичні основи застосування космічних і наземних даних у тепловому діапазоні для оцінки тепловтрат у місті по лінії «місто — район — окремий будинок». Результати проведених робіт стосовно Києва використовують природоохоронні та комунальні структури Київської міської держадміністрації. Розробки відділу з використання дистанційних даних для геології та геоекології впродовж останніх 15 років регулярно впроваджуються у підприємства Державної служби геології та надр України.

Національна академія наук України та Державне космічне агентство України визначили ЦАКДЗ головною організацією з науково-методичного керівництва дослідженнями з ДЗЗ, які виконуються установами НАН України. На базі Центру працюють наукова рада НАН України з проблеми «Вивчення природних ресурсів дистанційними методами» та спеціалізована рада із захисту докторських і кандидатських дисертацій у галузі технічних та геологічних наук за спеціальністю «Дистанційні аерокосмічні дослідження». ЦАКДЗ — перша в Україні наукова організація, яка свого часу була прийнята до Європейської асоціації лабораторій дистанційного зондування (EARSeL). Центр плідно співпрацює з Європейським космічним агентством (ESA), а також із космічними агентствами й установами США, Німеччини, Франції, Японії, Угорщини, Польщі, Білорусі, зокрема у межах програм GEOSS-GMES та ін.

У науковому доробку Центру — атласи «Україна з Космосу» та «Космос — Україні», комп'ютерно дешифровані космознімки українсько-російського космічного апарата «Океан-О», українського супутника «Січ-1»; підготовлено аналогічні матеріали знімків супутника «Січ-2», в яких показано можливість їхнього використання для вирішення актуальних для України природоресурсних і природоохоронних завдань.

Разом із Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу (IIASA) та Міжнародною програмою «Партнерські ініціативи в галузі наук про Землю з вивчення Північної Євразії» (NEESPI) у 2010 та 2012 рр. опубліковано російсько- й англомовний варіанти монографії «Зміни земних систем у Східній Європі», передмову до яких написав президент НАН України академік НАН України Б. Є. Патон.

Центр неодноразово посідав перші місця у Відділенні наук про Землю НАН України за кількістю одержаних патентів.

Упровадження розроблених у ЦАКДЗ новітніх супутникових технологій дозволило провести оцінку врожайності на полях Новобузького, Миколаївського та Новоодеського районів Миколаївської області під урожай 2012 р.; Фастівського району Київської області під урожай 2013 та 2014 рр.; південно-східних районів Київської області під урожай 2015 та 2016 рр. Матеріали передані ДУ «Держгрунтохорона» та ТОВ «Баришівська зернова компанія».

На основі розроблених технологій космічного геомоніторингу створено комплект цифрових карт (ГІС-технологія) пошкоджених територій Олевського району Житомирської області в результаті нелегального видобування бурштину. Передані матеріали будуть використані Центром екологічної освіти та інформації для проекту ПРООН/ГЕФ «Рекультивація земель, порушених внаслідок незаконного видобування корисних копалин на цінних природних територіях» для моніторингу екологічного стану та рекультивації земель, що зазнали знищення грунтово-рослинного шару внаслідок нелегального видобування бурштину.

Казенному підприємству спеціального приладобудування «Арсенал» передано робоче програмне забазпечення для субпіксельної обробки зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи «Січ» (2013 р.), та спеціалізований програмний модуль субпіксельної обробки кадрів поверхні Землі, які формуються сканером дальнього інфрачервоного діапазону (СДІЧ) у 2016 р., який буде використано для розробки програмного забезпечення для наземної обробки супутникових зображень, що формуються бортовою знімальною апаратурою перспективної супутникової системи ДЗЗ «Січ 2М».

До Департаменту житлово-комунальної інфраструктури Київської міської державної адміністрації (КМДА) передано базову ГІС для супутникового моніторингу при контролі розвитку зсувонебезпечних процесів на Правобережжі м. Київ. За матеріалами космічних зйомок проведено моніторингові дослідження розвитку зсувів упродовж останнього десятиріччя (2005—2015 рр.). Результати досліджень можуть бути використані при плануванні протизсувних заходів у м. Київ, наповненні муніципальної ГІС, коректуванні містобудівного планування та екологічної політики Київської Держадміністрації.

Результати дослідницької діяльності Центру високо поціновані в Україні. Вченим Центру присуджено Державні премії України в галузі науки і техніки:

• у 2004 р. — В. І. Ляльку (як співавторові) за цикл робіт під назвою «Наукові основи формування ресурсів підземних вод як джерела якісного водопостачання та раціонального господарського водокористування»;

• у 2005 р. — О. Д. Федоровському, М. О. Попову та О. І. Сахацькому (як співавторам) за цикл робіт під назвою «Розв'язання проблем раціонального природокористування методами аерокосмічного зондування Землі та моделювання геодинамічних процесів».

• у 2011 р. — С. А. Станкевичу (як співавтору) за цикл наукових праць, присвячених технології дешифрування космознімків.

Академік НАН України В. І. Лялько, член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський і професор М. О. Попов відзначені почесним званням «Заслужений діяч науки і техніки України».

Перспективи розвитку наукових досліджень Центру пов'язані зі створенням єдиної теорії ДЗЗ, в основу якої мають бути покладені сучасні уявлення наук про Землю, теорія енергомасообміну в геосистемах, досягнення в теорії систем; удосконалення моделей фізичних процесів, що відбуваються на суходолі та шельфі, у контексті досліджень нафтогазоперспективності територій; розроблення теоретико-методичних підходів, моделей, алгоритмів, демонстраційного програмного забезпечення та пілотних технологій комплексного геоінформаційного аналізу матеріалів аерокосмічних спостережень Землі і наземних даних, а також наукові рекомендації щодо впровадження цих розробок у практику; створення системи глобального та регіонального космічного екологічного моніторингу, зокрема моніторингу екологічного стану урбанізованих територій, аудиторського моніторингу балансу парникових газів для надійного обґрунтування та уточнення їхніх квот для різних країн та оцінювання потенційних можливостей продажу квот, зокрема Україною.

Результати досліджень Центру за 25-річний період його роботи відображено майже у 800 публікаціях у вітчизняних і зарубіжних виданнях, насамперед у 17 монографіях. Найбільш значущі з них такі: «Аэрокосмические методы в геоэкологии», «Космос — Україні: Атлас дешифрованих знімків території України з КА «Океан» та інших космічних апаратів», «Інформатизація аерокосмічного землезнавства», «Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування», «Изменения земных систем в Восточной Европе», «Earth Systems Change over Eastern Europe», «Спутниковые методы поиска полезных ископаемых», «Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки», навчальний посібник «Аерокосмічні знімальні системи» та науково-методичний посібник «Аерокосмічні дослідження геологічного середовища».

Робота Центру п'ять разів розглядалась на засіданнях Президії НАН України, кожного разу одержано високі оцінки.

Нині Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі динамічно розвивається, вирішує актуальні наукові та прикладні проблеми, сприяючи тому, щоб наукові здобутки його співробітників посіли гідне місце у вітчизняній та світовій науці та зробили гідний внесок у вирішення актуальних для України задач реальної економіки та оборони. Концептуально стратегія розвитку досліджень в ЦАКДЗ ІГН НАН України в перспективі до 2020 р. полягатиме в реалізації (з урахуванням науково-прикладної спеціалізації установи) основних положень розвитку світового суспільства, визначених рішеннями ООН зі сталого безконфліктного розвитку людства шляхом забезпечення його перш за все трьома необхідними складовими життєдіяльності, а саме — продовольством, питною водою та енергоресурсами.

У вирішенні цієї планетарної проблеми суттєву роль відіграватиме розробка сучасних методів та технологій використання матеріалів гіперспектральних прецизійних аерокосмічних зйомок та комп'ютерного моделювання процесів енергомасообміну в геосферах Землі з метою розробки рекомендацій для вибору сценаріїв раціонального природокористування в умовах збалансованого соціально-економічного розвитку різних країн при відповідних взаємних гарантіях оборонного характеру та міжнародної безпеки.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ МОНОГРАФІЙ

- 1. *Космическая* информация в геологии / Под ред. В. Г. Трифонова и др. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Аэрокосмические методы в геоэкологии / В. И. Лялько, Л. Д. Вульфсон, В. Ю. Жарый. — Киев: Наук. думка, 1992. — 206 с.
- Україна з космосу (Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів): 2-ге вид. / За ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. — Київ, 1999. — 34 с.
- Космос Україні (Атлас дешифрованих знімків території України з КА «Океан» та інших космічних апаратів) / За ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. Київ, 2001. 106 с.
- Нові методи в аерокосмічному землезнавстві / За ред.
  В. І. Лялька. Київ: 1999. 262 с.
- 6. *Інформатизація* аерокосмічного землезнавства / Ред. С. О. Довгий, В. І. Лялько. — Київ: Наук. думка, 2001. — 606 с.
- Словник із дистанційного зондування Землі / За ред.
  В. І. Лялька, М. О. Попова. Київ: СМП «АВЕРС», 2004. 170 с.
- Державний стандарт України ДСТУ 4220-2003 «Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять». Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 18 с.

- Державний стандарт України ДСТУ 4758:2007 «Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять». — Київ: Держспоживстандарт України, 2007. — 12 с.
- Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006. — 358 с.
- Аерокосмічні знімальні системи. Навчальний посібник / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. Львів: «Львівська політехніка», 2010. — 292 с.
- 12. Изменения земных систем в Восточной Европе / Ред. В. И. Лялько. — Киев: ПП «Фолиант». 2010. — 581 с.), за участю провідних фахівців ключових дослідницьких установ України, країн Європи (Міжнародний інститут прикладного системного аналізу — IIASA), а також США (Міжнародна програма з вивчення північної Євразії — NEESPI).
- Аерокосмічні дослідження геологічного середовища. Науково-методичний посібник / А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович, В. Л. Приходько та ін.; Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Державна геологічна служба. — Київ, 2010. — 246 с.
- Earth Systems Change over Eastern Europe / Eds P. Groisman, V. Lyalko. Kyiv: Akademperiodyka, 2012. 488 p.
- Спутниковые методы поиска полезных ископаемых / Под ред. акад. НАН Украины В. И. Лялько и д-ра техн. наук М. А. Попова. — Київ: Карбон-Лтд, 2012. — 436 с.
- 16. Инфраструктура спутниковых геоинформационных ресурсов и их интеграция: Сб. науч. ст. / Под ред. М. А. Попова, Е. Б. Кудашева. — Київ: ООО Карбон-Сервис, 2013. — 192 с.

 Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки / За ред. Лялька В. І. — Київ: Наук. думка, 2015. — 283 с.

Стаття надійшла до редакції 04.05.17

### В. И. Лялько, М. А. Попов, А. Д. Федоровский, В. Е. Филипович, С. М. Есипович, О. В. Седлерова

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

## К 25-летию СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «НАУЧНЫЙ ЦЕНТР АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛИ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ»

### V. I. Lyalko, M. A. Popov, A. D. Fedorovskyi, V. E. Filipovich, S. M. Esipovich, O. V. Sedlerova

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

ON THE 25th ANNIVERSARY OF FOUNDATION OF THE STATE INSTITUTE «SCIENTIFIC CENTRE FOR AEROSPACE RESEARCH OF THE EARTH OF THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE» doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2017.02.011

УДК. 553.911.98

## А. Д. Федоровский <sup>1</sup>, А. В. Хижняк <sup>1</sup>, Т. Н. Дьяченко <sup>2</sup>, В. Г. Якимчук <sup>1</sup>, Д. Л. Подгорняк <sup>1</sup>, К. Ю. Суханов <sup>1</sup>, О. В. Томченко <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт гидробиологии Национальной академии наук Украины, Киев

# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОДНЫХ ПОТОКОВ УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ РЕК (НА ПРИМЕРЕ ДНЕПРА И ДУНАЯ)

Изложен способ оценки водных потоков устьевых областей рек по структурным характеристикам с использованием зависимости нормированной азимутальной спектральной плотности от углового направления. На основе информации космического мониторинга выполнен сравнительный анализ гидрологических характеристик устья Днепра и Килийской дельты Дуная за 1986 и 2015 гг. При этом было установлено, что спектры изображений устьевого участка Днепра за 1986 и 2015 гг. При этом было установлено, что спектры изображений устьевого участка Днепра за 1986 и 2015 гг. При этом было установлено, что спектры изображений устьевого участка Днепра за 1986 и 2015 годы практически не изменились ни по интенсивности, ни по азимутальному расположению, в отличие от дельты Дуная, где за исследуемый период наблюдаются существенные изменения водных потоков.

Ключевые слова: космический мониторинг, гидрологические характеристики, спектр Фурье.

Мониторинг и моделирование потоков реки является важным шагом в планировании и анализе водных ресурсов на основе наземной и космической информации. Для наземной информации анализ Фурье является инструментом в гидрологическом исследовании при прогнозировании гидрологических систем для анализа и проектирования водохозяйственных систем и управления речными бассейнами. В работах [7, 8] рассматривается моделирование течения реки с использованием моделей, основанных на рядах Фурье. Однако в этих работах рассматриваются временные ряды состояния потоков реки, а в данной статье исследуются пространственные характеристики водных объектов, которые определяются по космическим снимкам.

При дешифрировании космических снимков наряду с оптическими спектральными признаками предлагается использовать структурные и текстурные параметры изображений, что позволяет извлекать больший объем информации [5]. Одним из информативных признаков структурных характеристик изображения объектов является их пространственно-частотный спектр (ПЧС) [6]. Изменению яркости и координат точек в плоскости изображения объекта в терминах спектрального анализа соответствует изменение амплитуды и фазы по пространственным частотам. Воспользуемся для оценки водных потоков устьевых областей методологией пространственно-частотного анализа.

Изображению водного объекта (ВО), имеющему определенную структуру, соответствует ПЧС, характеризующийся суммой пространственных составляющих (гармоник) с соответс-

<sup>©</sup> А. Д. ФЕДОРОВСКИЙ, А. В. ХИЖНЯК, Т. Н. ДЬЯЧЕНКО, В. Г. ЯКИМЧУК Д. Л. ПОДГОРНЯК, К. Ю. СУХАНОВ,

О. В. ТОМЧЕНКО, 2017



**Рис. 1.** Пересекающиеся линии (*a*) и график азимутальной спектральной плотности пересекающихся линий *S* в зависимости от углового направления  $\Theta(\delta)$ 

твующими амплитудами и фазовыми сдвигами между этими составляющими. Значения амплитуд определяют вклад соответствующих пространственных частот в формирование изображения BO, а значения фазовых сдвигов определяют изменение координат отдельных точек в изображении относительно их положения в объекте. В качестве ПЧС наиболее часто используется двумерный спектр Фурье:

$$C(\mathbf{v}_{x},\mathbf{v}_{y}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \times \exp[-j2\pi (\mathbf{v}_{x}x + \mathbf{v}_{y}y)] \cdot dx \cdot dy, \qquad (1)$$

где L(x, y) — яркость изображении в точке (x, y),  $v_x$  и  $v_y$  — значения пространственных частот по осям *X* и *Y*,  $C(v_x, v_y)$  — пространственная гармоника по осям в точке  $(v_x, v_y)$ ,  $j = \sqrt{-1}$ .

Для определения направления линейных элементов изображения используется зависимость нормированной азимутальной спектральной плотности (АСП) энергетического спектра от углового направления  $\Theta$ . Вычисление АСП осуществляется по формуле [2]

$$S(\Theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Theta - \Delta \Theta}^{\Theta + \Delta \Theta} |C(\Theta, r)|^2 \cdot d\Theta \cdot dr$$

где  $|C(\Theta, r)|$  — амплитуда спектра изображения в точке ( $\Theta$ , r),  $\Theta$  — угол направления двумерной часто-ты в полярных координатах, смещенный на 90°, r — модуль пространственной частоты, или ее радиус в полярных координатах.

Была выполнена программная реализация метода на языке python (https://www.python.org) с

модулем numpy (http://www.numpy.org) для вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и с модулем pillow (https://python-pillow. org) для работы с цифровыми изображениями.

Алгоритм. Для определения направления линейных элементов изображения производилось определение нормированной азимутальной спектральной плотности энергетического спектра в зависимости от углового направления  $\Theta$ .

1. Вычисляется амплитудный спектр Фурье исследуемого фрагмента изображения в декартовой системе координат по формуле ДПФ:

$$C(m_x, m_y) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} L(n_x, n_y) \times$$

$$\times \exp[-j2\pi (n_x m_x + n_y m_y) / N]$$

где N — число отсчетов по вертикали и горизонтали квадратного цифрового изображения,  $n_x$ ,  $n_y$  — номера отсчетов по вертикали и горизонтали, L — значение яркости пикселя,  $m_x$ ,  $m_y$  — номера пространственных гармоник по вертикали и горизонтали,  $C(m_x, m_y)$  — значение ДПФ.

2. Производится пересчет спектра изображения в полярную систему координат по формулам

•  $r = \text{round}(\sqrt{m'_x^2 + m'_y^2})$  — для отсчета радиуса, где round — функция округления,  $m'_x = m_x + N/2$ ,  $m'_x = m_y + N/2$ ;

•  $\Theta = \arctan(m'_y / m'_x) + \pi / 2 - для угла направления.$ 

3. Спектральная энергетическая плотность определяется по формуле

$$S(\Theta) = \sum_{r=0}^{N/2} |C(r,\Theta)|^2 \cdot r , \qquad (2)$$

где r — номер отсчета (радиус),  $\Theta$  — угол направления, N — число отсчетов, S — азимутальная спектральная плотность.

Суть метода определения направления русловых потоков объясняется рис. 1. На рис. 1, *а* изображены две параллельные линии, которые пересекает третья линия под некоторым углом, а на рис. 1,  $\delta$  — график нормированной азимутальной спектральной плотности  $S(\Theta)$  для этого изображения, вычисленный в соответствии с (2). Максимумы АСП указывают положение линий в координатных осях, определяют угол между ними, а также видно, что пик от двух параллельных линий больше по интенсивности пика одной линии.

Если в исходном изображении устьевых областей рек имеются протяженные рукава, косы и наносные острова, то будет наблюдаться расширение ПЧС в направлениях, перпендикулярных к направлению наибольшей их протяженности. В этом случае для амплитудного спектра, преобразованного в полярные координаты, определяется азимутальная спектральная плотность по направлениям. Углы, соответствующие направлениям с локальными максимальными значениями амплитудной составляющей, указывают доминирующие направления протяженных элементов. Это показывает возможность обнаружения с помощью двумерных преобразований Фурье направления развития многорукавного устья-дельты на цифровых изображениях рек.

Предлагаемый подход был нами использован при анализе доминирующих направлений устьевых потоков Днепра и Дуная. На рис. 2, *а*, *б* изображены космические снимки устья Днепра за 1986 и 2015 гг. соответственно. На рис. 2, *в* показано азимутальное распределение пространственно-частотного спектра *S* ( $\Theta$ ) изображения водных потоков, вычисленное в соответствии с (2). Из рис. 2, *в* видно, что спектры изображений устьевого участка Днепра за 1986 и 2015 гг. практически не изменились ни по интенсивности, ни по азимутальному расположению ПЧС. В соответствии с рис. 1 максимумы в районе 150 ... 175° характеризуют основные потоки устьевого участка Днепра.

Объяснением полученного результата может быть работа [3], в которой указано, что Днепровский лиман является своеобразным продолжением каскада днепровских водохранилищ, его наиболее низкой ступенью, но созданной естественными факторами (подъемом уровня моря и затоплением) в условиях, аналогичных перекрытию долины Днепра плотинами ГЭС. Наблюдаемое поднятие спектра в области 0° и 180° отражает влияние на АСП изображения береговой линии и прибрежной зоны.

Дельта Дуная является примером одного из крупнейших в мире плавнево-литорального ланд-



**Рис. 2.** Анализ доминирующих направлений устьевых потоков Днепра:  $a, \delta$  — космические снимки устья Днепра в 1986 г. («Ландсат 5») и в 2015 г. («Ландсат-8»),  $\beta$  — соответствующие азимутальные спектры (кривая 1 — 1986 г., кривая 2 — 2015 г.)

шафтного комплекса и при этом обладает целостным набором эколого-ценотических признаков, характеризующих ее как переходное природное образование — экотон типа «река — море». Как известно, такие функциональные объекты играют в биосфере одну из важнейших ролей как зоны контакта энергомассового взаимообмена и концентрации всех проявлений жизни, в т. ч. повышенного биоразнообразия, усиленной активности эколого-физиологических, биопродукционных и всех других процессов функционирования экосистем. При этом дельта Дуная, как и ряд других подобных ей объектов, находится в настоящее время под усиленным разнотипным антропогенным воздействием как на локальном, региональном, так и на глобальном уровнях. Такое сочетание биосферной роли этого уникального природного комплекса и его современного положения в природно-экосистемной хозяйственной структуре региона делает крайне необходимым ускоренное изучение этого комплекса на общеэкологическом уровне с выявлением максимально возможного количества эколого-ценотических взаимосвязей и закономерностей, с выходом на выработку



*Рис. 3.* Анализ доминирующих направлений устьевых потоков Дуная: *а*, *б* — космические снимки Килийской дельты Дуная в 1986 г. («Ландсат-5») и в 2015 г. («Ландсат-8»), *в* — соответствующие азимутальные спектры (кривая *1* — 1986 г., кривая *2* — 2015 г.)

системы практических мер по поддержанию экосистемной устойчивости.

На рис. 3, *а*, *б* изображены космические снимки устья Дуная за 1986 и 2015 гг. соответственно. На рис. 3, *в* показан график азимутального распределения пространственно-частотного спектра  $S(\Theta)$  изображения в соответствии с водными потоками, вычисленный в соответствии с (2).

В отличие от Днепра АСП Килийской дельты Дуная за 2015 г. (рис. 3, *в*) значительно изменилась по сравнению с 1986 г. как по уменьшению интенсивности, так и по азимутальному расположению пиков ПЧС.

При сопоставлении графика рис. 3, *в* с изображением дельты Килийского рукава Дуная на космическом снимке можно отметить, что основным потокам соответствуют пики ПЧС под углами 30°, 65° и 130°... 170°, причем энергетически достаточно насыщенные, что указывает на преобладание более низких частот. Пик ПЧС в районе 90° ... 100°, очевидно, соответствует вертикально расположенной на космическом снимке береговой линии.

Выявленные изменения в Килийской дельте Дуная, которые согласуются с результатами работы [2], можно объяснить тем, что в связи с сокращением за последние 10 лет твердого стока Дуная из-за строительства плотин на реке и ее притоках, с перераспределением стока воды и наносов из Килийского рукава в Тульчинский и выходом Килийской дельты на большие глубины, интенсивность ее выдвижения в море сократилась (по сравнению с началом XX века) почти в десять раз. Определенную роль сыграло и повышение уровня Черного моря. Образование новых рукавов в дельте прекратилось. Наоборот, наблюдается отмирание многих боковых водотоков. При этом из двух смежных рукавов, как правило, активизируется более водоносный и короткий рукав.

Следствием перераспределения стока между рукавами, отмиранием одних и активизацией других, является поперечное смещение русла главного рукава в каждом узле разветвления, поскольку по мере отмирания бокового рукава угол его отделения быстро увеличивается, а угол продолжения главного русла уменьшается. В результате русло главного рукава ниже узла разветвления смещается в сторону берега, от которого отходит отмирающий рукав, а выше узла разветвления — в противоположную сторону. К искривлению русел приводит и смещение вниз по течению боковых перекатов, находящихся в истоках небольших рукавов.

Кроме сравнительного анализа русловых потоков Днепра и Дуная, был выполнен анализ динамики водных потоков Килийской дельты Дуная для семи месяцев 2015 г. с мая по ноябрь (рис. 4). Видно, что при практической неизменности расположения интенсивность водного потока существенно изменялась по месяцам. Так, самыми полноводными были октябрь и май, а маловодными — ноябрь и июль, что характерно для рассматриваемых времен года.

Таким образом, использование двумерных пространственно-частотных спектров Фурье



**Рис. 4.** Азимутальные спектры  $S(\Theta)$  водных потоков береговой линии Килийской дельты Дуная для семи дат с мая по ноябрь 2015 г.

позволяет значительно увеличить объем получаемой информации по гидрологическим параметрам водных масс, в частности характеру доминирующих течений и их интенсивности, наличии подпора водохранилища, особенностях перераспределения водных потоков и приносимых ими в устьевые области загрязнений.

- Бермант А. Ф., Араманович И. Г. Краткий курс математического анализа для втузов: Учеб. пособие для втузов. — М.: Наука, 1971. — 736 с.
- Гидрология дельты Дуная / Под ред. В. Н. Михайлова. М.: ГЕОС, 2004. — 448 с.
- Дубняк С. С. Эколого-гидроморфологический анализ биотопической структуры крупных равнинных водохранилищ // Географ. вестник. — 2013. — № 3 (26). — С. 107—120.
- Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М., 1978. — 848 с.
- 5. Федоровский А. Д., Сиренко Л. А., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. Спектральные и пространственно-частотные информативные признаки дешифрирования водных ландшафтов на аэрокосмических снимках // Гидробиол. журн. — 2002. — **38**, № 1. — С. 87—95.
- 6. *Янути Д. А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков. М: Недра, 1991. 240 с.
- Ali Saremi, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi, Amin Rouzbahani, Amin Saremi. Simulation of river flow using Fourier series models // Int. Conf. on Environmental and Computer Science IPCBEE. – Singapore: IACSIT Press, 2011. – 19. – P. 133–138.
- 8. Soheil Ghareaghaji Zare, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi. Fourier analysis models and

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2

their application to river flow's prediction // The 1st Int. Applied Geological Congress. — Mashad Branch, Iran: Department of Geology, Islamic Azad University, 2010. — P. 510—514.

Стаття надійшла до редакції 08.12.16

## REFERENCES

- Bermant A. F., Aramanovich I. G. A short course of mathematical analysis for technical schools: Textbook for higher technical schools, 736 p. (Nauka, Moscow, 1971) [in Russian].
- Hydrology of the Danube Delta / Ed. by V. N. Mikhailov, 448 p. (GEOS, Moscow, 2004) [in Russian].
- Dubnyak S. S. Ecological-hydromorphological analysis of the biotopic structure of large plain reservoirs [Jekologogidromorfologicheskij analiz biotopicheskoj struktury krupnyh ravninnyh vodohranilishh]. Geographical Bull., 3 (26), 107–120 (2013) [in Russian].
- Rabiner L., Gould B. Theory and application of digital signal processing, 848 p. (Moscow, 1978) [in Russian].
- Fedorovsky A. D., Sirenko L. A., Sukhanov K. Yu., Yakimchuk V. G. Spectral and spatial-frequency informative features of interpretation of water landscapes on aerospace photographs [Spektral'nye i prostranstvennochastotnye informativnye priznaki deshifrirovanija vodnyh landshaftov na ajerokosmicheskih snimkah]. Hydrobiol. J., 38 (1), 87–95 (2002) [in Russian].
- Yanutsh D. A. Decoding aerospace images, 240 p. (Subsoil, Moscow, 1991) [in Russian].
- Ali Saremi, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi, Amin Rouzbahani, Amin Saremi. Simulation of river flow using Fourier series models. Int. Conf. on Environmental and Computer Science IPCBEE, 19, 133–138 (2011).

- 8. Soheil Ghareaghaji Zare, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi. Fourier analysis models and their application to river Flow's prediction. The 1st International Applied Geological Congress, 510–514, (Mashad Branch, Iran, Department of Geology, Islamic Azad University, 2010).
- О. Д. Федоровский <sup>1</sup>, А. В. Хижняк <sup>1</sup>,
- Т. М. Дьяченко<sup>2</sup>, В. Г. Якимчук<sup>1</sup>, Д. Л. Підгорняк<sup>1</sup>,
- К. Ю. Суханов<sup>1</sup>, О. В. Томченко<sup>1</sup>
- <sup>1</sup> Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ
- <sup>2</sup> Інститут гідробіології Національної академії наук України, Київ

## КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ВОДНИХ ПОТОКІВ ГИРЛОВИХ ОБЛАСТЕЙ РІЧОК (НА ПРИКЛАДІ ДНІПРА ТА ДУНАЮ)

Викладено спосіб оцінки водних потоків гирлових областей річок за структурними характеристиками з використанням залежності нормованої азимутальної спектральної щільності від кутового напрямку. На основі інформації космічного моніторингу виконано порівняльний аналіз гідрологічних характеристик гирла Дніпра і Кілійської дельти Дунаю за 1986 і 2015 рр. При цьому було встановлено, що спектри зображень гирлової ділянки Дніпра за 1986 і 2015 роки практично не змінилися ні за інтенсивністю, ні по азимутальному розташуванню, на відміну від дельти Дунаю, де за досліджуваний період спостерігаються істотні зміни водних потоків. *Ключові слова*: космічний моніторинг, гідрологічні характеристики, спектр Фур'є.

- O. D. Fedorovskyi<sup>1</sup>, A. V. Khyzhniak<sup>1</sup>, T. N. Diachenko<sup>2</sup>, V. G. Yakimchuk<sup>1</sup>, D. L. Pidhorniak<sup>1</sup>, K. Yu. Sukhanov<sup>1</sup>, O. V. Tomchenko<sup>1</sup>
- <sup>1</sup> State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv
- <sup>2</sup> Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

### SPACE MONITORING OF WATER STREAM IN ESTUARIAL AREAS (BY THE EXAMPLE OF THE DNIEPER AND THE DANUBE)

We propose a new method of estimation of river estuary water stream by structure characteristic. The method is based on the dependence of normalized azimuthal spectral density on the angular direction. We applied this method to a space monitoring data and conducted a comparative analysis of hydrological characteristics of the Dnieper estuary and the Kilia Danube Delta in a period from 1986 to 2015. It was found that the image spectra of the Dnieper mouth area from 1986 to 2015 have not changed either in intensity or in azimuth location, as op-posed to the Danube delta, where the water flows have endured significant changes during the analyzed period.

*Keywords*: space monitoring, hydrological characteristics, Fourier spectrum.

doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2017.02.017

УДК 004.9

## І. М. Бутко, В. М. Мамарєв, В. В. Ожінський, С. П. Харченко

Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, Київ

# ІНФОРМАЦІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ В СИСТЕМІ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Географічні інформаційні ресурси є важливою складовою інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень. В умовах відсутності вітчизняних космічних апаратів дистанційного зондування Землі відомчі геоінформаційні системи забезпечуються безкоштовними та придбаними за бюджетні кошти даними. Відсутність законодавчого базису, належного рівня координації та взаємодії у процесі закупівлі інформації дистанційного зондування Землі призводить до неефективного витрачання коштів державного бюджету. За результатами проведеної роботи зі збору та систематизації потреб 59 органів державного управління в інформації дистанційного зондування Землі сформовано зведену заявку потреб органів державної влади, яку статистично оброблено та проаналізовано за показниками: періодичності спостережень визначених районів, рівнів обробки даних, площі території та орієнтованої вартості їхніх зйомок. Продемонстровано, що оптимізація заявок користувачів дозволить забезпечити виконання близько 90 % тематичних завдань з використанням умовно безкоштовної інформації дистанційного зондування Землі. Розроблено та організації горядку наповнення державних геоінформацій лорядку наповнення державних геоінформаційних систем даними дистанційного зондування Землі.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, географічні інформаційні ресурси, зведена заявка органів державної влади, класифікатор тематичних задач.

Складність державного управління обумовлена об'єктивним протиріччям між вимогами з актуальності, достовірності, достатності, доступності, автентичності до управлінських рішень та суперечливістю умов, обмеженістю наявних ресурсів та недостатністю інформації для їхнього прийняття. Процес підготовки таких рішень має на меті формування повної сукупності альтернатив за результатами моделювання складної суперпозиції цілей, шляхів, ресурсів та результатів, що обумовлює необхідність збору і опрацювання великих обсягів різнопланової інформації.

З метою інформаційно-аналітичної підтримки процесу прийняття управлінських рішень створюються географічні інформаційні ресурси, які забезпечують комплексування і відображення карт, схем, космічних зображень, аерозображень, статистичних даних та інших асоційованих з ними атрибутів.

Динамічне збільшення протягом п'яти останніх років кількості космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що надають на безоплатній основі вільний доступ до інформації (Sentinel, «Ландсат», «Терра», «Проба-V» та інші), обумовило зростання питомої ваги таких даних у геоінформаційних системах органів держаного управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на сьогодні в Україні розвитку теорії державного управління [1, 2] та геоінформаційних систем [3—5] приділяється значна увага. Незва-

<sup>©</sup> I. M. БУТКО, B. M. MAMAPEB,

В. В. ОЖІНСЬКИЙ, С. П. ХАРЧЕНКО, 2017



**Рис.** 1. Розподіл включених до Зведеної заявки органів державного управління

жаючи на це, на сьогодні в Україні не сформовано законодавчий і практичний базис створення та ведення загальнодержавних баз геопросторових даних. Відсутність Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» (Концепцію проекту Закону схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України ще у 2007 р.), призводить до того, що геоінформаційні ресурси державного сектору України, у переважній більшості створюються за відомчим принципом (проблемне спрямування, територіальне охоплення тощо). Це, у свою чергу, призводить до неузгодженості інформаційних потоків, методологій обробки інформації, дублювання функцій. Негативним наслідком цього є збільшення витрат державного бюджету на їхнє створення, супровід і використання та зниження якості і цінності інформації як основи функціонування системи інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень у державі.

Частиною загальної проблеми формування загальнодержавних геоінформаційних ресурсів, яка не врахована у проекті Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», є порядок наповнення цих ресурсів інформацією ДЗЗ. Сьогодні в умовах відсутності вітчизняного угруповання космічних апаратів ДЗЗ відомчі географічні інформаційні системи забезпечуються даними, що закуповуються за бюджетні кошти в іноземних компаній-операторів або комерційних дистриб'юторів. При відсутності належного рівня координації та взаємодії, витрати коштів державного бюджету є неоптимальними. Метою нашої роботи є аналіз потреб органів державного управління в інформації ДЗЗ та формування пропозицій з оптимізації порядку отримання та обробки даної інформації.

Для оцінки потреб державних користувачів в інформації ДЗЗ проведено збір та систематизацію заявок міністерств, служб, агентств, інспекцій та обласних державних адміністрацій та сформовано Зведену заявку з моніторингу території України засобами ДЗЗ (далі — Заявка). Заявка відображає визначені 59 органами державного управління (рис. 1) 151 тематичне завдання з деталізацією: періодичності проведення спостережень, рівня обробки даних, площі території та орієнтованої вартості їхньої зйомки.

За результатами аналізу Заявки встановлено:

• за періодичністю спостережень (рис. 2) потреба у щоденному отриманні даних ДЗЗ складає лише 5 % від загального числа визначених тематичних задач та в основному сформована користувачами сектору безпеки та оборони (силовими міністерствами та службами); щотижневі потреби — 25 %, обумовлені задачами моніторингу стану снігового покриву, прогнозування зон підтоплення, пірогенної ситуації на полях та торфовищах тощо; щомісячні та щоквартальні спрямовані на моніторинг уповільнених природних процесів та антропогенної діяльності;

• за критерієм просторового розрізнення аналіз ускладнювався неоднозначністю формування користувачами вимог до кінцевого продукту. Так, наприклад, для задачі контролю пірогенної ситуації на полях та торфовищах у окремих заявках визначене просторове розрізнення від 1 до 30 м. Враховуючи, що площа торф'яних родовищ в Україні становить близько 1 млн га (10 000 км<sup>2</sup>), під час аналізу задача була зведена до організації моніторингу зазначених територій з просторовим розрізненням 15—30 м, надалі — до моніторингу пожежонебезпечних зон з вищим просторовим розрізненням.

За результатами аналізу встановлено, що 71 % визначених тематичних задач можуть розв'язуватись з використанням даних ДЗЗ низького та середнього просторового розрізнення;

• за критерієм «рівень обробки», виходячи з даних табл. 1 [5], державні органи в процесі прийняття управлінських рішень найбільше зацікавлені в отриманні інформації з рівнем обробки 3, як видно з діаграми (рис. 4), необроблені дані користувачами є незатребуваними. Це пояснюється специфікою обробки даних ДЗЗ, високою вартістю спеціалізованих програмних продуктів, необхідною високою кваліфікацією та значним практичним досвідом персоналу.

З метою обгрунтування твердження про можливу оптимізацію сформованих користувачами заявок за приклад візьмемо техногенну катастрофу, спричинену вибухом і наступним займанням нафтопродуктів на нафтобазі біля села Крячки Васильківського району Київської області, що почалася 8 червня 2015 р. і тривала вісім днів.

Отримані заявки Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС), Міністерства екології та природних ресурсів України, Міністерства аграрної політики та продовольства України узагальнено з метою найбільш раціонального забезпечення потреб користувачів, оперативності надання та мінімізації вартості придбаної інформації ДЗЗ.

В результаті оптимізації заявок як джерело інформації ДЗЗ обрано, запуск якого здійснено в рамках спільного проекту НАСА та Геологічної служби США КА «Ландсат-8», обладнаний приладом Operational Land Imager (характеристики наведено в табл. 2) [U. S. Geological Survey: Landsat Missions [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://landsat.usgs.gov/landsat-8 (дата звернення: 27.02.2017). — Назва з екрану]. Космічний апарат «Ландсат-8» у різних спектральних діапазонах забезпечує детальність знімків від 15 до 30 м з круговою похибкою не більше 12 м.

*Таблиця 1.* Рівні обробки даних дистанційного зондування Землі

Рівень	Тип обробки
0	Необроблені дані
1	Радіометрична і геометрична корекція з метою швидкого перегляду
2	Радіометрична і геометрична корекція (стандартна продукція)
3	Спеціальна обробка стандартної продукції рівня 2 (наприклад, злиття знімків або поліпшення їхньої якості)



*Рис. 2.* Розподіл потреб державних органів за періодичністю спостереження, %



*Рис. 3.* Розподіл потреб державних органів за просторовим розрізненням, %

Отриманий знімок території нафтобази (рис. 5) було тематично оброблено одночасно в інтересах декількох органів державної влади. В інтересах ДСНС оцінено розмір та просування «лінії вогню», загальні масштаби пожежі, ймовірні напрямки її просування, ступінь загроз для прилеглих територій та об'єктів, напрямок димового шлейфу (рис. 6). Для потреб Мінекології визначено основні райони виникнення загроз екологічній безпеці громадян та навколишньому природному середовищу у зоні виникнення антропогенної катастрофи та наближених ділянках території, перелік населених пунктів, які попали в зону дії димового шлейфу та випадання шкідливих опадів і продуктів горіння, напрямок руху димового шлейфу та орієнтовну площу територій, уражених наслідками катастрофи (рис. 7). За заявкою Мінагрополітики побудовано тематичну карту оцінки площ територій земельних угідь і посівів, що були уражені



*Рис. 4.* Розподіл потреб державних органівза рівнем обробки, %



*Рис. 5.* Знімок території техногенної катастрофи з КА «Ландсат-8»

внаслідок антропогенної катастрофи; крім того, це дозволило протягом декількох місяців потому відстежити вплив техногенного ураження на стан посівів та урожайність (рис. 8).

Актуальність створених тематичних карт підтверджено результатами отриманими Міністерством екології та природних ресурсів України та Держекоінспекцією України в рамках здійснення кризового моніторингу з метою вивчення екологічного стану в зоні пожежі на нафтобазі ТОВ «Побутрембудматеріали» та в розташованих поблизу районах.

Таким чином, наведений приклад доводить, що при раціональному підході до вибору вихідної інформації для прийняття управлінського рішення можливо зекономити значні матеріальні ресурси. Якщо для прийняття такого рішення необхідна інформація високого просторового розрізнення, то економічний ефект буде більш вагомим.

За результатами проведеного дослідження можна сформувати пропозиції з регулювання та організації порядку наповнення державних геоінформаційних систем даними ДЗЗ.

Таблиця 2. Ха	рактеристики	приладу О	<b>Derational</b>	Land
Imager KA «J	Іандсат-8»			



*Рис. 6.* Обробка знімка (рис. 5) в інтересах Державної служби з надзвичайних ситуацій

Спектральний канал	Довжина хвилі, мкм	Детальність знімка, м
Канал 1 — Узбережжя та аерозолі	0.433 - 0.453	30
Канал 2 — Синій	0.45 — 0.515	30
Канал 3 — Зелений	0.525 — 0.6	30
Канал 4 — Червоний	0.63 — 0.68	30
Канал 5 — Ближній інфрачервоний	0.845 — 0.885	30
Канал 6 — Ближній інфрачервоний 2	1.56 — 1.66	30
Канал 7 — Ближній інфрачервоний 3 Канал 8 —	2.1 — 2.3	30
Панхроматичний	0.5 — 0.68	15
Канал 9 — Перисті хмари	1.36 — 1.39	30

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2

На першому етапі необхідно сформувати зведений перелік задач органів державного управління, які можуть бути розв'язані з використанням даних ДЗЗ. На другому етапі — забезпечити формалізацію заявок користувачів, для чого на основі зведеного переліку задач розробити Класифікатор тематичних задач ДЗЗ, орієнтовна структура якого представлена у табл. 3.

На наступному етапі — за формалізованими заявками органів державної влади та з урахуванням приладів, що забезпечують зйомку у необхідних спектральних діапазонах, оптимізувати потреби користувачів за критерієм оперативності отримання інформації, тим самим скоординувавши роботи з наповнення відомчих та регіональних геоінформаційних систем даними ДЗЗ. Це забезпечить раціональне використання державних коштів на придбання даних ДЗЗ. Логічним продовженням даної роботи стане формування національного Плану спостереження території України космічними системами ДЗЗ.

## висновки

Узагальнюючи результати дослідження, можна обґрунтовано зробити такі висновки:

 потреби центральних органів виконавчої влади у даних ДЗЗ за кількістю тематичних завдань наразі значно вищі за потреби обласних державних адміністрацій;

• 96 % користувачів зацікавлені в отриманні інформації ДЗЗ з рівнем обробки 2 та 3;

 близько 73 % визначених у заявках тематичних них завдань можливо оперативно та ефективно виконати за допомогою інформації ДЗЗ низького та середнього просторового розрізнення;

• орієнтовна вартість робіт з закупівлі даних ДЗЗ за заявками органів державної влади станом на грудень 2016 р. становить близько 300 млн євро на рік;



Рис. 7. Обробка знімка (рис. 5) в інтересах Мінекології



*Рис. 8.* Обробка знімка (рис. 5) в інтересах Мінагрополітики

Таблиця З. Класифікатор тематичних задач дистанційного зондування Землі

Тематичне визначення завдання			Необхідний матеріал		Необхідні характеристики матеріалів Д33				
Область	Розділ	Тема	Завдання	Тематична карта (схема)	Об'єкт спостереження	Роздільна здатність, м	Спектральні діапазони, мкм	Прилад	Клас оперативності

 оптимізація заявок користувачів за визначеними у статті критеріями дозволить забезпечити виконання близько 90 % тематичних завдань з використанням умовно безкоштовної інформації ДЗЗ.

- Бутко М. П., Дітковська М. Ю. Формування інформаційного забезпечення в системі державного управління: монографія. — Ніжин: Аспект-Поліграф, 2010. — 244 с.
- Державне управління: підруч.: у 2 т. / Під ред. Ю. В. Ковбасюка, К. О. Ващенка, Ю. П. Сурміна та ін. — К.: Дніпропетровськ: НАДУ, 2012. — Т. 1. — 564 с.
- Пітак І. В., Негадайлов А. А., Масікевич Ю. Г. та ін. Геоінформаційні технології в екології: Навч. посіб. — Чернівці, 2012. — 273 с.
- Морозов В. В., Шапоринська Н. М., Морозов О. В., Пічура В. І. Геоінформаційні системи в агросфері: Навч. посіб. — К.: Аграрна освіта, 2010. — 269 с.
- 5. *Чандра А. М., Гош С. К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы: Учеб. пособие. М.: Техносфера, 2008. 328 с.

## REFERENCES

- 1. *Butko M. P., Ditkovs'ka M. Yu.* Formuvannia informatsijnoho zabezpechennia v systemi derzhavnoho upravlinnia: monohrafiia [Formation of informational support in public administration: monograph], 244 p. (Aspekt-Polihraf, Nizhyn, 2010) [in Ukrainian].
- Kovbasiuk Yu. V., Vaschenko K. O., Surmin Yu. P., et al. Derzhavne upravlinnia: pidruchnyk: u 2 t. [Public administration: the textbook: in 2 vol.], 564 p. (NADU, K., Dnipropetrovs'k, 2012) [in Ukrainian].
- Pitak I. V., Nehadajlov A. A., Masikevych Yu. H., et al. Heoinformatsijni tekhnolohii v ekolohii : Navchal'nyj posibnyk [GIS technology in ecology: Textbook], 273 p. (Chernivtsi, 2012) [in Ukrainian].
- Morozov V. V., Shaporyns'ka N. M., Morozov O. V., Pichura V. I. Heoinformatsijni systemy v ahrosferi : navch. posib [Geographic information systems in the agricultural domain: Textbook], 269 p. (Ahrarna osvita, K., 2010) [in Ukrainian].
- 5. *Chandra A. M., Hosh S. K.* Dystantsyonnoe zondyrovanye y heohrafycheskye ynformatsyonnye systemy: Uchebnoe

posobye [Remote sensing and geographic information systems: Textbook], 328 p. (Tekhnosfera, M., 2008) [in Russian].

### И. М. Бутко, В. М. Мамарев, В. В. Ожинський, С. П. Харченко

Национальный центр управления и испытаний космических средств Государственного космического агентства Украины, Киев

## ИНФОРМАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СИСТЕМЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Географические информационные ресурсы являются важной составляющей информационной поддержки принятия управленческих решений. В условиях отсутствия отечественных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли ведомственные геоинформационные системы обеспечиваются приобретенными за бюджетные средства данными. Отсутствие надлежащего уровня координации и взаимодействия в процессе закупки информации дистанционного зондирования Земли приводит к неэффективным расходам средств государственного бюджета. По результатам проведенной работы по сбору и систематизации потребностей 59 органов государственного управления в информации дистанционного зондирования Земли сформирована сводная заявка потребностей органов государственной власти, которая статистически обработана и проанализирована по показателям: периодичности наблюдений определенных районов, уровней обработки данных, площадей территорий и ориентированной стоимости их съемок. Продемонстрировано, что оптимизация заявок пользователей позволит обеспечить выполнение около 90 % тематических задач с использованием условно бесплатной информации дистанционного зондирования Земли. Разработаны предложения по регулированию и организации порядка наполнения государственных геоинформационных систем данными дистанционного зондирования Земли.

*Ключевые слова*: дистанционное зондирование Земли, географические информационные ресурсы, сведенная заявка органов государственной власти, классификатор тематических задач.

## I. M. Butko, V. M. Mamarev, V. V. Ozhynsky, S. P. Kharchenko

National Center of Space Facilities Control and Test of the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

### INFORMATION OF THE EARTH'S REMOTE SENSING IN THE SYSTEM OF THE STATE GOVERNING: CURRENT STATUS AND PERSPECTIVES

Geographic information resources are an important component of informational support for managerial decisions. Under conditions of the absence of domestic remote sensing satellites, the institutional geographic information systems are provided with free and budget-purchased data. The state budget funds are being spent inefficiently under the absence of a legislative base, an adequate level of coordination and cooperation in the procurement of remote sensing data. With this aim we conducted and completed the work on collecting and systematizing the needs of 59 bodies of the Ukrainian state administrations in remote sensing data. According to the results of this work, we systemized and prepared the "joint application" for disposal of needs of public authorities. It was processed statistically and analyzed in terms of the following parameters: frequency of observations of defined areas, levels of data processing, surface areas and their approximate imaging costs. It was demonstrated that the optimization of user applications would provide execution of about 90% of thematic tasks requiring the relatively cost-free remote sensing data. We elaborated the proposals on regulation and procedure of filling the state GIS with remote sensing data, which are described briefly in this paper too.

*Keywords*: remote sensing, geographic information resources, "joint application" of state authorities, thematic objectives classifier.

doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2017.02.024

УДК 629.7.023.224

## И.А. Гусарова

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днипро

# ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Разработана технология получения легковесового теплоизоляционного материала из волокон на основе оксида кремния диаметром 2...3 мкм и связующего «кремнезоль» для теплозащиты многоразовых космических аппаратов при температурах наружной поверхности не более 1100 °C. Теплоизоляционные плитки получены путём формования гидромассы на установке вибрационного формования. Определены физико-механические и теплофизические параметры материала.

**Ключевые слова:** теплоизоляция, керамические волокна, космические аппараты, механические характеристики, теплофизические свойства.

Одна из особенностей развития ракетно-космической техники — высокий темп усложнения и обновления конструкций. Каждое поколение космических аппаратов характеризуется новым комплексом конструктивно-технологических параметров и новыми материалами. Важной задачей при создании современных многоразовых космических аппаратов (МКА) является разработка надежной теплозащиты, имеющей приемлемые габаритно-массовые параметры и стоимость. Особо важной является разработка теплозащиты наветренной (нижней) поверхности, так как здесь температуры 600...1100 °С реализуются по всей площади поверхности, что составляет около 43 % площади поверхности MKA [5].

Требования к теплозащитным конструкциям МКА существенно отличаются от таковых для одноразовых изделий ракетно-космической техники (РКТ), поскольку для них неприемлем основной вид теплозащиты — абляционная теплозащита. Теплозащита LRSJ и HRSJ MKA «Спейс

Шаттл», предназначенная для поддержания температуры обшивки КА не выше 450 К (177 °C), была изготовлена на основе супертонких кварцевых волокон [5]. Подобные материалы на основе оксида кремния с плотностью от 150 до 200 кг/м<sup>3</sup> применялись на самолете «Буран». Одним из достоинств таких материалов является способность выдерживать тепловой удар до температуры 1250...1400 °C с последующим практически мгновенным охлаждением и минимальным коэффициентом температурного расширения  $\alpha = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

В настоящее время в качестве тепловой изоляции высокотемпературных агрегатов во всем мире используются волокнистые материалы. Низкая кажущаяся плотность, малая теплопроводность, высокая термостойкость, а также высокая радиационная и химическая стойкость делают эти материалы перспективными для теплоизоляции всех технических высокотемпературных систем. Совмещение же таких волокон с известными высокотемпературостойкими связующими позволяет создавать новые эффективные теплоизоляционные изделия.

<sup>©</sup> И. А. ГУСАРОВА, 2017

В качестве высокотемпературостойких волокон с температурой применения более 1000 °С используют кварцевые, кремнеземные и муллитокремнеземные волокна, называемые еще алюмосиликатными или каолиновыми [3, 4].

Высокотемпературоустойчивые кварцевые волокна выпускаются в виде непрерывных и штапельных волокон. Температура их длительной эксплуатации от -250 до +1250 °С.

Кремнеземные волокна получают выщелачиванием легкорастворимых оксидов из силикатных стекол при действии на них растворов щелочей и кислот. Для уменьшения пористости и увеличения прочности эти волокна аппретируются растворами кремнийорганических соединений и других полимерных веществ. Такая нить после термообработки длительно работает при температуре от -250 до +1100 °C, имеет усадку менее 1 % и обладает достаточной изгибоустойчивостью и прочностью, обеспечивающей возможность ее текстильной переработки [2].

Муллито-кремнеземные волокна диаметром 2—3 мкм выпускаются в виде ватного рулонного ковра плотностью 130 кг/м<sup>3</sup>, фетра и войлока. Они эксплуатируются в широком диапазоне температур от -250 до +1050 °C.

В качестве связующего для получения высокотемпературостойких теплоизоляционных материалов в зависимости от назначения используются самые различные композиции. Наиболее широкое применение нашли связующие на базе жидкого натриевого стекла, ортофосфорной кислоты и композиций на их основе [7]. Из жидкого стекла получают связующее «кремнезоль» [8], с помощью которого получают прочные волокнистые теплоизоляционные материалы, обладающие при температуре более 1000 °С малой усадкой. Подобные материалы получают также с использованием кремнегеля или этилсиликата. Наиболее широкое применение из связующих на базе ортофосфорной кислоты нашли алюмофосфатная связка (АФС) или алюмохромфосфатная связка (АХФС).

Технология изготовления теплоизоляционных блоков основана на получении изделий путем пропитки слоев ткани в связующем или путем смешения со связующим, в процессе чего получается гидромасса, из которой готовятся теплоизоляционные изделия методом вакуумного или вибрационного формования [1]. Сформированные изделия сушатся в сушильном шкафу.

Несмотря на многообразие теплоизоляционных волокнистых высокотемпературных материалов, создание теплоизоляции для многократно используемых КА с жесткими весовыми ограничениями является сложной научно-технической проблемой. Технология создания высокотемпературной легкой теплоизоляции (ВЛТИ) с ограничением на удельный вес 100 кг/м<sup>3</sup> разрабатывается специалистами ГП КБ «Южное» и НПП «Стекловолокно» (рис. 1). На первом этапе был проведен выбор связующего, для чего изготавливались образцы из муллито-кремнеземного волокна МКРР-130 с применением четырех видов связующих:

- этилсиликатного связующего,
- алюмофосфатного связующего,
- связующего «кремнегель»,
- жидкостекольного связующего.

Изготовление образцов проводилось путем смешения в емкостях вручную. После формования образцы подвергались сушке в шкафу при T = 150 °C в течение 12 ч. Для образцов на базе связующего АФС сушка была продолжена еще на 3 ч — при температуре 300 °C. После сушки образцы обжигались в муфельном шкафу при температуре 1000 °C в течение трех часов.

Анализ образцов показал, что:

1) образцы лучшего качества получаются с использованием связующего АФС и кремнегеля;

 наименышая миграция связующего из середины на поверхность образцов осуществляется с использованием в связующем водной дисперсии ПВА;



**Рис.** 1. Блок-схема разработки технологии изготовления высокотемпературной легкой теплоизоляции

3) наиболее прочные образцы получаются при использовании в качестве порошкообразного наполнителя корунда или каолина. Однако при этом резко увеличивается их плотность до 200...250 кг/м<sup>3</sup>, поэтому в дальнейшей работе они не использовались.

Для дальнейших работ были отобраны два вида связующего — алюмофосфатное и кремнегель.

Следующим этапом работ был выбор технологии формования плит. Формование теплоизоляции осуществлялось на установке вакуумного формования. Для работы по изготовлению плит поочередно были использованы отрезки волокна МКРР-130, кремнеземного волокна и кварцевого волокна длиной 5...30 мм.

На установке вакуумного формования с выбранным связующим и по разработанной ранее технологии были отформованы, высушены, обожжены три плиты  $500 \times 500 \times 50$  мм: на волокне МКРР-130, на кремнеземном волокне и на кварцевом волокне.

В процессе изготовления плит установлено, что гидромасса плиты на волокне МКРР-130 и гидромасса плиты на кремнеземном волокне получается равномерной и хорошо формуется. Однако при заданной плотности в 100 кг/м<sup>3</sup> плиты получаются рыхлыми и при сушке дают усадку. После обжига плиты дали еще большую усадку. Плотность их увеличилась до 220 кг/м<sup>3</sup>, связующего в плитах было мало, оно все было отжато. Прочность плит очень низкая.

При формовании плиты на кварцевом волокне гидромасса получилась не равномерной, сбитой в комки и плохо формовалась. Для получения плиты гидромасса вручную распределяется по пресс-форме. Плита на кварцевом волокне была без усадки, однако связующего было так же мало, и прочность плиты была очень низкой.

Проведенные работы показали, что изготовление плит из кварцевого волокна на установке вакуумного формования не может обеспечить получение равномерной, хорошо формующейся гидромассы и требуемую прочность плит.

Достаточно высокая прочность кварцевого волокна позволяет достичь равномерного распределения его в смесителе с концентрацией волокна не более 6 % и последующим его осаждении в перфорированной пресс-форме. Были изготовлены специальные смеситель и пресс-форма на один образец размером 155 × 155 × 35 мм. Дальнейшие работы проводились на этой пресс-форме, установленной на установке вибрационного формования.

На третьем этапе на установке вибрационного формования была отработана технология изготовления плит на двух выбранных связующих (алюмофосфатном и кремнегеле) на волокнах МКРР-130, кремнеземном и кварцевом.

Образцы плит на кремнеземном волокне МК-PP-130 дают сильную усадку. Плиты получаются только с плотностью выше 250 кг/м<sup>3</sup>. Образцы плит с кварцевым волокном на связующем АФС обладают плотностью 160 кг/м<sup>3</sup>, а на связующем кремнезоль — 100...120 кг/м<sup>3</sup>.

В качестве ВЛТИ выбрана волокнистая теплоизоляция из волокон на основе оксида кремния с диаметром волокна 2...3 мкм и связующего кремнезоль (кремнеземный гель).

Состав материала ВЛТИ: 80...85 % волокна на основе чистого SiO<sub>2</sub>, 15...20 % кремнеземный гель.

Полученные теплоизоляционные плиты ВЛТИ представлены на фото (рис. 2) и имеют плотность 100 кг/м<sup>3</sup>. Была изготовлена опытная партия таких теплоизоляционных плит и определены физико-механические и теплофизические характеристики нового материала.

При этом предел прочности при сжатии (ГОСТ 473.6-81) составил:

в плоскости — 0.038 МПа,

на ребро — 0.026 МПа.

Предел прочности при статическом изгибе (ГОСТ 473.8-81) составил:

в плоскости — 0.092 МПа,

на ребро — 0.1 МПа.

Теплофизические характеристики ВЛТИ в рабочем диапазоне температур определялись на плитах размером 150 × 150 мм и толщиной от 33 до 37 мм.

Теплоемкость ВЛТИ определялась с помощью прибора ИТ-с-400 при температурах до 400 °C. На рис. 3 представлена зависимость полученных данных теплоемкости от температуры.

Теплопроводность материала в рабочем диапазоне температур определялась путем решения обратной задачи теплопроводности. Для этого были определены тепловые поля в материале при нагреве.

Схема испытаний представлена на рис. 4. Испытания заключались в одностороннем радиационно-конвективном нагреве образцов, установленных во входном проеме муфельной печи, и регистрацией температуры нагреваемой и тыльной поверхностей образца, а также на глубине 5, 10, 15 и 20 мм от нагреваемой поверхности в центральной части образца. Температуры измеряли термопарами типа ХА (хромель — алюмель) толщиной 0.2 мм. Для установки образцов в проеме печи использовали державки в форме рамки из шамотного огнеупорного материала.

Печь предварительно разогревалась до заданной температуры (1100 или 1200 °C), подготовленный образец с термопарами после достижения указанной температуры устанавливался в проем печи, включалась система измерения температуры. Образец находился в печи 20 мин.

Термопары устанавливали в центре образца в параллельных коротких (40 мм) прорезях, а их концы выводили в керамической теплоизоляции («соломке») через тыльную поверхность образца, как показано на рис. 5, 6.

Результаты испытаний ВЛТИ в виде записанных показаний термопар в процессе нагрева приведены на рис. 7. Температурные поля представлены зависимостями от времени температур на указанных расстояниях от нагреваемой поверхности.

Высококонтрастные фотографии тыльной поверхности нагреваемого образца, приведенные на рис. 8, показывают, что образец прогревается неравномерно по его площади. Изображение получено при полном затемнении помещения.

Полученное изображение свидетельствует о существенной неоднородности материала теплоизоляции, вызванной, скорее всего, комкованием образующих его волокон, темные участки соответствуют зонам с большей плотностью (темные участки в центре образцов соответствуют слою силикатного клея, используемого для монтажа термопар).

На рис. 9 показано распределение температуры на тыльной поверхности образца, полученное



*Рис.* 2. Теплоизоляционные плиты высокотемпературной легкой теплоизоляции



*Рис. 3.* Экспериментальная зависимость теплоемкости *С* теплоизоляции ВЛТИ от температуры (кривая *1*). Кривая *2* — данные для ТЗМК-10 [5]



*Рис.* 4. Схема испытаний высокотемпературной легкой теплоизоляции



*Рис.* 5. Схема заделки термопар в образцах: 1 — образец; 2 — термопара; 3 — керамическая «соломка»



Рис. 6. Образец с термопарами



*Рис.* 7. График распределения температуры в образце: 1 — на лицевой поверхности образца, 2 — на глубине 8 мм, 3 — на глубине 15 мм, 4 — на глубине 25 мм, 5 — на тыльной поверхности образца

пирометром Flus IR-86 1U. Серые круги обозначают в масштабе зону измерения пирометра. Распределение хорошо согласуется с картиной свечения этой поверхности (рис. 8). Участки с более высокими температурами 554...556 °C (рис. 9), соответствующие материалу с меньшей теплопроводностью, и следовательно, плотностью, совпадают со светлыми зонами низкой плотности (рис. 8).

Таким образом, в исследуемых образцах теплоизоляции температурное поле не может рассматриваться как одномерное даже на локальном участке в центре с диаметром, соизмеримым с толщиной образца (40 мм). Пространственный масштаб неоднородности поля значительно меньше зоны расположения термопар. Это означает, что определяемые в эксперименте температурные кривые относятся к зонам образца с различной плотностью и с различными распределениями температуры.

Микроструктурный анализ ВЛТИ подтвердил неравномерное распределения волокон в материале, а также показал наличие неволокнистых включений (рис. 10).

Структура материала ТЗМК-10, используемого на орбитальном самолете «Буран», снятая для сравнения на том же микроскопе, более равномерная, и содержание неволокнистых включений значительно меньше.

Эти выводы подтверждаются химическим составом материалов (таблица).

Так как экспериментальные образцы ВЛТИ имеют неоднородную структуру, точно определить расстояние термопар, установленных внутри образца, от поверхности нагрева не удается и, соответственно определение теплопроводности по тепловым полям в материале дает неточные результаты.

Поэтому был принят следующий алгоритм определения теплопроводности ВЛТИ в рабочем диапазоне температур.

1. Теплопроводность ВЛТИ была рассчитана на основе зависимости теплопроводности от плотности для материалов ТЗМК-10 и ТЗМК-25 [6] с плотностью 150 и 250 кг/м<sup>3</sup> соответственно при допущении, что его теплопроводность зависит от плотности в такой же степени, как и для материалов ТЗМК-10 и ТЗМК-25. Результаты определения теплопроводности в рабочем диапазоне температур представлены на рис. 11.

2. На основе полученного значения теплопроводности ВЛТИ были определены расчетные тепловые поля во всех испытуемых образцах.

3. По результатам сравнения экспериментальных и расчетных полей во всех исследуемых образцах приведена в соответствие глубина установки термопар, требующих ее корректировки.

4. С использованием скорректированных расстояний от нагреваемой поверхности до термопар с помощью программы ICP31 (обратная задача теплопроводности) была определена теплопроводность ВЛТИ в рабочем диапазоне температур (рис. 12). Видно, что теплопроводность разрабатываемой теплоизоляции ВЛТИ в первом приближении можно описать линейной зависимостью  $\lambda = -0.015 + 1.429 \cdot 10^{-4} T$ .

Установлено, что толщины 33...37 мм ВЛТИ достаточно, чтобы не допустить перегрева летательного аппарата. При температуре нагреваемой поверхности около 1100 °С температура нижней поверхности не превышает 250 °С.

Таким образом, в рамках проведенного исследования разработана технология получения материала ВЛТИ, имеющего плотность 100 кг/м<sup>2</sup> и теплопроводность ниже, чем у известных теплоизоляционных материалов космического назна-



*Рис. 8.* Внешний вид тыльной стороны образца в процессе испытаний



*Рис.* 9. Распределение температуры на тыльной поверхности образца (°С)

чения T3MK-10, T3MK-25. Для использования в штатных конструкциях РКТ материал необходимо доработать в части обеспечения однород-

Химический состав теплоизоляционных материалов (%)

Материал	Al	Si	0	Р	Ca	Fe	Cr	
ВЛТИ	2.34	38.74	44.29	10.87	1.86	1.90	_	
ТЗМК-10 (плитка «Буран»)	—	45.19	51.65	—	0.44	2.12	0.60	

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2



**Рис. 10.** Микроструктура теплоизоляционных материалов: *а* – ВЛТИ, *б* – плитка ТЗМК-10 («Буран»)



*Рис.* 11. Зависимость теплопроводности  $\lambda$  теплоизоляционных материалов на основе SiO<sub>2</sub> от температуры: T3MK-10, T3MK-25 — данные литературные и ВЛТИ

ности его структуры, что обеспечит повышение механических характеристик и стабильность теплофизических свойств в его объеме.

- Астамян В. В., Гедеонов П. П. Ускорение термообработки и сушки теплоизоляционных изделий на жидком стекле // Стройматериалы. — 1985. — № 12. — С. 11—18.
- 2. Бабашов В. Г., Варрик Н. М. Высокотемпературный гибкий волокнистый теплоизоляционный материал // Тр. ВИАМ. — 2015. — № 1. — 11 с. — (URL:www. viam-works.ru).



*Рис.* 12. Зависимость теплопроводности λ высокотемпературной легкой теплоизоляции от температуры

- 3. *Бабашов В. Г., Луговой А. А., Карпов Ю. В.* Температуропроводность гибкого градиентного теплоизоляционного материала // Науковедение. 2015. 7. 16 с. (http:naukovedenie.ru/pdf).
- Бобышев В. Г., Ивахненко Ю. А., Щетанов Б. В. Теплозащитные материалы // Рос. хим. журн. — 2010. — 54, № 1. — С. 12—20.
- Гофин М. Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. — М.: Мир, 2003. — 671 с.
- Моржухина А. В. Высокоточные методы экспериментального и математического моделирования процессов теплообмена в слоях высокопористых теплоза-

щитных покрытий летательных аппаратов: Дис. .. канд. техн. наук. — М.: МАИ, 2014. — 118 с. — Машинопись.

- Сычев М. М. Неорганические клеи. Л.: Химия, 1986. — 77 с.
- Фрейденберг А. С., Хворов Н. В. Кремнезоль как эффективное связующее для огнеупорных композиций // Огнеупоры. — 1989. — № 10. — 17 с.

Стаття надійшла до редакції 04.01.17

### REFERENCES

- 1. Astamyan V., Gedeonov P. Speed-up of heat processing and drying of heat insulation products using liquid glass. Building materials, N 12, 11–18 (1985).
- Babashov V. G., Varrik N. M. High-temperature flexible fibrous heat-insulating material. *Proceedings of VIAM*, N 1, 11 p. (2015) (URL: www.viam-works.ru).
- Babashov V. G., Lugovoi A. A., Karpov Yu. V. Thermal diffusivity of flexible gradient heat insulation material. *Internet J. Sci.*, 7, 16 p. (2015) (http://naukovedenie.ru/pdf).
- 4. Bobyshev V. G., Ivakhnenko Yu. A., Shchetanov B. V. Thermal protection materials. *Russian Chem. J.*, **54** (N 1), 12–20 (2010).
- 5. *Gofin M*. Heat-resisting and thermal-protected constructions of reusable space vehicles, 671 p. (Mir, Moscow, 2003).
- 6. *Morzhuhina A*. Higly-precise methods of experimental and mathematical process simulation of heat exchange in layers of highly-porous thermal protected cover of space vehicles. Dissertation in support of candidature for a technical degree, 118 p. (MAI, Moscow, 2014).
- 7. Sychev M. Inorganic adhesives, 77 p. (Chemistry, L., 1986).
- Freudenberg A., Hvorov N. Siliceous as effective binding material for fire-resisting compositions. *Fire Resistant*, N 10, 17 p. (1989).

#### I. О. Гусарова

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро

## ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ КЕРАМІЧНИХ ВОЛОКОН

Розроблено технологію виготовлення легковагового теплоізоляційного матеріалу з волокон на основі оксиду кремнію діаметром 2...3 мкм і зв'язника «кремнезоль» для теплозахисту багаторазових космічних апаратів при температурах, не більших за 1100 °С. Теплоізоляційні плитки одержано шляхом формування гідромаси на установці вібраційного формування. Визначено фізикомеханічні і теплофізичні параметри матеріалу.

*Ключові слова*: теплоізоляція, керамічні волокна, космічні апарати, механічні характеристики, теплофізичні властивості.

#### I. A. Gusarova

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro

### HIGH-TEMPERATURE HEAT-INSULATION MATERIAL ON THE BASIS OF CERAMIC FIBERS

We present a new developed technology of producing a lightweight thermal insulation material made of fibers. It is based on silicon oxide with a diameter of 2...3  $\mu$ m and a binder of silica for the heat protection of reusable space vehicles at outer surface temperatures not exceeding 1100 °C. The heat-insulating tiles have been obtained by forming a hydro-mass in a vibration-forming unit. The physics-mechanical and thermophysical properties of the material are determined and described as well.

*Keywords*: heat insulation, ceramic fiber, space vehicle, mechanical characteristics, thermal-physical properties

doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2017.02.032 УДК 523.3-36:523.43-36:577.112.384.4:577.175.82:612.815.1

А. О. Пастухов, М. В. Дударенко, М. О. Галкін,

Н. В. Крисанова, А. Г. Назарова, Н. Г. Позднякова, Т. О. Борисова

Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, Київ

# СТВОРЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОВМІСНОГО АНАЛОГУ МАРСІАНСЬКОГО ПИЛУ ТА ОЦІНКА ЙОГО ВПЛИВУ НА ТРАНСПОРТ НЕЙРОМЕДІАТОРІВ НЕРВОВИМИ ТЕРМІНАЛЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЩУРІВ

Вуглець широко поширений в марсіанському пилу, метеоритах і міжзоряному просторі. В рамках даного дослідження розроблено новий вуглецевовмісний аналог марсіанського пилу, який складався з неорганічного аналогу марсіанського пилу, отриманого з вулканічного попелу (JSC, Mars-1A, ORBITEC, США) та вуглецю (наноалмазу). Була проведена оцінка ефекту цього аналогу на ключові характеристики синаптичної нейротрансмісії. Вперше показано, що вуглецевовмісний аналог марсіанського пилу, створений на основі наноалмазів, суттєво знижує початкову швидкість накопичення та збільшує позаклітинний рівень нейромедіаторів L-[<sup>14</sup>C]глутамату та [<sup>3</sup>H]ГАМК (ү-аміномасляної кислоти) в нервових терміналях головного мозку щурів. Ефект вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу пов'язаний виключно з активністю його вуглецевої складової, а не з неорганічними компонентами. Найбільш важливим є те, що вуглецева складова нативного марсіанського пилу може мати шкідливий вплив на позаклітинний гомеостаз нейромедіаторів в ЦНС, що призводить до дисбалансу збудливих/гальмівних сигналів і серйозних неврологічних наслідків. Отже, токсична дія вуглецевих структур у складі марсіанського пилу може бути значно більшою у порівнянні з впливом неорганічної складової.

**Ключові слова**: аналог марсіанського пилу, транспорт глутамату, транспорт ГАМК, глутаматергічна нейротрансмісія, ГАМК-ергічна нейротрансмісія, нервові терміналі головного мозку.

Щодня на Землю падають тонни вуглецевих молекул у частинках пилу та у метеоритах. Нещодавній nanoSIMS-аналіз вуглецю з Тісінтського марсіанського метеориту надав докази наявності у минулому підземних органічних рідин на Марсі. Наявність органічних речовин, інкапсулованих у внутрішніх лакунах метеориту, наводить на думку про те, що вони утворилися ще до падіння, і це є надійним доказом їхнього марсіанського походження, а не земного забруднення. Ці органічні речовини можуть бути результатом осадження багатих на органіку рідин біля поверхні Марса [12, 13].

Позаземні пілотовані місії, які включають вихід у відкритий космос, вимагають оцінки ризику токсичності міжзоряного та планетарного пилу. Механізми формування, склад і фізичні властивості планетарного пилу (у тому числі і марсіанського) та його вплив на здоров'я людини, зокрема нейротоксична дія, недостатньо охарактеризовані [12, 13, 15, 19]. Виявилось, що частинки місячного ґрунту сорбуються на скафандрах і потрапляють всередину космічних кораблів [19,

<sup>©</sup> А. О. ПАСТУХОВ, М. В. ДУДАРЕНКО, М. О. ГАЛКІН, Н. В. КРИСАНОВА, А. Г. НАЗАРОВА, Н. Г. ПОЗДНЯКОВА,

Т. О. БОРИСОВА, 2017

20]. Внаслідок прямого контакту з частинками місячного пилу протягом декількох місій «Аполлонів» спостерігалось подразнення очей, дихальних шляхів та шкіри астронавтів. Було продемонстровано, що місячний пил, а також тверді наночастинки є причиною запалення [6, 7], яке, як відомо, може змінювати проникність гематоенцефалічного бар'єру [1]. Нейротоксична дія марсіанського пилу може реалізуватись через інгібування синтезу нейромедіатора, зміну потоку іонів через клітинні мембрани, блокування транспорту нейромедіаторів у нервових закінченнях головного мозку.

Глутамат та у-аміномасляна кислота (ГАМК) є основними збуджувальним та гальмівним нейромедіаторами у центральній нервовій системі ссавців, що беруть участь у більшості аспектів нормального функціонування мозку. Позаклітинна концентрація глутамату між його квантовим вивільненням зберігається у нормі на низькому рівні, тим самим запобігаючи постійній активації рецепторів глутамату і розвитку ексайтотоксичності [5]. Зміни активності транспортерів глутамату та ГАМК є характерною рисою нейрологічних і нейродегенеративних захворювань, а також супроводжують перебування в умовах зміненої гравітації [4]. Глутаматні та ГАМК-транспортери є інтегральними мембранними білками, функції яких тісно пов'язані з плазматичною мембраною. Висловлено припущення, що марсіанський пил може впливати на плазматичну мембрану завдяки значній реакційній поверхні і пористості. Тривалість дії пилу при довгостроковій місії, особливо у поєднанні з іншими шкідливими для людини факторами, зокрема зміненою гравітацією, радіацією, УФопроміненням тощо, може посилити його шкідливий вплив.

У нашому дослідженні оцінку нейротоксичних ризиків для здоров'я від впливу аналогу марсіанського пилу проводили відповідно до рекомендацій з оцінки ризику нейротоксичності (US Environmental Protection Agency, 1998 р., згідно з пунктом 3. Оцінка небезпеки: 3.1.2 Дослідження на тваринах; 3.1.2.3 Нейрохімічні наслідки нейротоксичності; 3.1.3.4. *In vitro* дані нейротоксикології). Методологічні підходи передбачали дослідження in vitro безпосереднього впливу аналогу марсіанського пилу на ключові характеристики глутаматергічної та ГАМК-ергічної нейротрансмісії.

Беручи до уваги відомі раніше факти: 1) наявність вуглецю у марсіанських метеоритах [10, 16]; 2) транспорт наночастинок до центральної нервової системи з дихальної системи [17]; 3) значний вплив нанорозмірних компонентів-забруднювачів повітря на центральну нервову систему та 4) експериментальні дані щодо негативного впливу наноалмазів на транспорт глутамату та ГАМК у нервових терміналях, — це дослідження було присвячене створенню вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу та дослідженню його дії на ключові характеристики передачі нервового імпульсу. У дослідженні використовували препарат, який складався з аналогу марсіанського пилу JSC, Mars-1A, збагаченого вуглецевим компонентом — наноалмазами, одержаними методом детонаційного синтезу [18]. Основним питанням роботи було з'ясувати, чи може вуглецевовмісний аналог марсіанського пилу призводити до розвитку нейрологічних порушень та порівняти його дію з впливом неорганічного аналогу марсіанського пилу та наноалмазів per se. Метою дослідження було проаналізувати вплив вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу на Na<sup>+</sup>-залежне транспортер-опосередковане накопичення та позаклітинний рівень L-[<sup>14</sup>C]глутамату та [<sup>3</sup>H]ГАМК в ізольованих нервових закінченнях головного мозку щурів.

## методи дослідження

*Матеріали*. В роботі були використані такі матеріали та реактиви: HEPES, (N-2-hydroxyethyl-piperazine-n-2-ethanesulfonic acid), «Fluka» (Швейцарія); EDTA, «Calbiochem» (США); фіколл-400, додецилсульфат натрію, амінооксиоцтова кислота; скловолокнові фільтри Whatman GF/C «Sigma» (США); L-[<sup>14</sup>C]глутамат, сцинтиляційні рідини ACS та OSC, «Amer-sham», (Велика Британія); [<sup>3</sup>H]ГАМК, «Perkin Elmer» (США).

Аналог марсіанського пилу JSC, Mars-1A виробництва компанії ORBITEC (Orbital Technologies Corporation, США) був одержаний з родовищ вулканічного попелу, що осідав з повітря та містив (у %): SiO<sub>2</sub> (34.5), TiO<sub>2</sub> (3), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (18.5), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (19), FeO (2.5), MnO (0.2), MgO (2.5), CaO (5), Na<sub>2</sub>O (2), K<sub>2</sub>O (0.5), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.7).

Порошки наноалмазів були отримані методом детонаційного синтезу із застосуванням технологій, розроблених в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України [2, 18].

*Етичні норми.* Всі експерименти були виконані згідно із «Правилами проведення робіт з використанням експериментальних тварин», затверджених Комісією з догляду, утримання й використання експериментальних тварин Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України (Протокол № 1 від 19/09-2012).

Дослідження проводили на білих щурах-самцях лінії Wistar. Щурів утримували на стандартному раціоні віварію.

Виділення синаптосом з головного мозку щурів. Синаптосоми виділяли за методом Котмана [8] із незначними модифікаціями. Концентрацію протеїну визначали за методом Ларсона [14].

Визначення накопичення L-[<sup>14</sup>C]глутамату *синаптосомами*. Накопичення L-[<sup>14</sup>C]глутамату синаптосомами визначали так: зразки суспензії з концентрацією протеїну 250 мкг/мл преінкубували 8 хв при 37 °C, потім додавали аналог марсіанського пилу та інкубували 2 хв. Реакцію ініціювали додаванням суміші L-глутамату та L-[<sup>14</sup>C] глутамату (0.1 мкКі/мл, 251 мКі/ммоль) та інкубували при температурі 37 °С. Аліквоти відбирали через 1, 2 та 10 хв, а потім швидко осаджували у мікроцентрифузі «Eppendorf» (20 с при перевантаженні 10000g). Накопичення визначали в аліквотах надосаду (100 мкл) та солюбілізованого в SDS осаду за допомогою сцинтиляційного лічильника «Delta 300» («Tracor Analytic», США) в сцинтиляційній рідині ACS (aqueous counting scintillate — сцинтиляційна рідина для водних зразків) (1.5 мл).

Визначення вивільнення L-[<sup>14</sup>C]елутамату з синаптосом. Суспензія синаптосом розводилася стандартним сольовим розчином так, що містила 1 мг протеїну/мл, і після 10 хв преінкубації при 37 °C навантажувалася L-[<sup>14</sup>C]глутаматом (500 нМ, 238 мКі/ммол) в кальцієвому стандартному сольовому розчині упродовж 10 хв. Після цього суспензія синаптосом відмивалася 10 об'ємами стандартного сольового розчину і розводилася до концентрації 1 мг протеїну/мл і відразу використовувалася для визначення вивільнення L-[<sup>14</sup>C]глутамату з синаптосом.

Аліквоти (120 мкл, 25 — 30 мкг навантажених L-[<sup>14</sup>C]глутаматом синаптосом), преінкубували 8 хв при 37 °C, потім додавали аналог марсіанського пилу та інкубували 2 хв. Нестимульоване вивільнення L-[<sup>14</sup>C]глутамату з синаптосом у безкальцієвому середовищі визначали за 6 хв. Суспензію синаптосом швидко осаджували у мікроцентрифузі та центрифугували при перевантаженні 10000 протягом 20 с. Аліквоти надосаду (90 мкл) та солюбілізованого додецилсульфатом натрію осаду (90 мкл) змішували з синтиляційною рідиною ACS (1.5 мл) та визначали радіоактивність за допомогою синтиляційного лічильника «Delta 300». Загальний вміст радіоактивності визначали як суму радіоактивності у аліквоті надосаду та у аліквоті солюбілізованого осаду.

Визначення накопичення [<sup>3</sup>H]ГАМК синаптосо*мами*. В дослідах з акумуляції [<sup>3</sup>H]ГАМК синаптосомами стандартний сольовий розчин містив 100 мкМ амінооксиоцтової кислоти, інгібітора ГАМК-трансамінази, для запобігання утворення метаболітів ГАМК. Концентрація протеїну синаптосом у пробі дорівнювала 200 мкг/мл, об'єм проби складав 0.6 мл. Синаптосоми преінкубували 5 хв при 37 °С з аналогом марсіанського пилу, після чого ініціювали процес акумуляції внесенням суміші ГАМК (1 мкМ ГАМК та 50 нМ — 0.2 мкКі/мл [<sup>3</sup>H]ГАМК). Через 1 та 5 хв аліквоти (0.5 мл) фільтрували через GF/Cфільтри. Фільтри двічі промивали охолодженим стандартним сольовим розчином, висушували та вимірювали рівень радіоактивності у сцинтиляційній рідині OCS в лічильнику «Delta 300».

**Визначення вивільнення [**<sup>3</sup>**Н]ГАМК з синапто**сом. Синаптосоми (2 мг протеїну/мл) в оксигенованому стандартному сольовому розчині, який містив 10 мкМ амінооксиоцтової кислоти, інкубували 5 хв при 37 °С при наявності 5·10<sup>-7</sup> М (0.1 Кі/мл) [<sup>3</sup>H]ГАМК. Після охолодження на льоду суспензію втричі розводили охолодженим сольовим розчином і центрифугували 5 хв при перевантаженні 4000g. Осад суспендували при температурі 4 °С і концентрації протеїну 1 мг/мл в сольовому розчині, який містив 10 мкМ амінооксиоцтової кислоти. Синаптосоми, що акумулювали [<sup>3</sup>H]ГАМК (1 мг протеїну/мл), негайно використовували для вивчення процесів вивільнення ГАМК. Синаптосоми (120 мкл суспензії) преінкубували 8 хв при 37 °С, потім додавали аналог марсіанського пилу та інкубували 2 хв. Зразки інкубували ще 5 хв, після чого центрифугували у мікроцентрифузі (10000g, 20 с). Рівень радіоактивності вивільненої [<sup>3</sup>H]ГАМК в аліквотах супернатанту (90 мкл) вимірювали в лічильнику «Delta 300» з використанням сцинтиляційної рідини ACS (1 мл на 1 аліквоту). Вміст міченої ГАМК у супернатантах був виражений у відсотках від загального вмісту [<sup>3</sup>H]ГАМК в синаптосомах.

*Статистична обробка результат*и представлені як середнє  $\pm$ СКВ в *n* незалежних експериментах. Різницю між двома групами перевіряли на значущість за допомогою *t*-критерію Стьюдента при рівні значимості *P*  $\leq$  0.05. Статистичну обробку даних, побудову графіків і розрахунки функцій проводили з використанням програми Ехсеl.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримання вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу. Складність вивчення марсіанського пилу (МП) пов'язана з його неоднорідністю, оскільки він є сумішшю часток різного розміру і хімічного складу. Для збільшення кількості нанорозмірних частинок в МП останній піддавався такій процедурі. Суспензію МП у концентрації 2 мг/мл у воді обробляли ультразвуком частоти 22 кГц протягом 1 хв при кімнатній температурі та витримували протягом 2 хв. Коли великі частки осаджувались, осад видаляли, а супернатант використовували в експериментах. Вуглецевий компонент, а саме наноалмази (НА), використовувався для отримання модифікованого вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу. Було отримано препарат з концентрацією 2 мг/мл з ваговим співвідношенням 1:1 неорганічних і вуглецевих компонентів (НА-МП).

Методом динамічного розсіювання світла було проведено аналіз розмірів частинок аналогу мар-

сіанського пилу та синаптосом.

Середній розмір частинок у суспензії аналогу марсіанського пилу у стандартному сольовому розчині, розрахований на основі п'яти вимірювань, кожне протягом 1 хв, становив 4500 ± 1000 нм. Крім того, у препараті аналогу було виявлено фракцію частинок з малим розміром (50—60 нм). Розмір вуглецевого компонента складав від 5 до 50 нм.

*Експерименти з використанням L-[<sup>14</sup>C]глутамату.* Виявлено, що НА-МП значно знижував початкову швидкість накопичення і акумуляцію L-[<sup>14</sup>C]глутамату (10 мкМ) протягом 10 хв у синаптосомах (на 25 % і 50 % відповідно). Початкова швидкість дорівнювала  $2.86 \pm 0.15$  нмоль·хв<sup>-1</sup>мг<sup>-1</sup> протеїну в контрольних синаптосомах і  $2.16 \pm 0.17$  нмоль·хв<sup>-1</sup>мг<sup>-1</sup> протеїну в синаптосомах при наявності НА-МП. Акумуляція L-[<sup>14</sup>C] глутамату дорівнювала  $9.42 \pm 0.40$  нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну в контрольних синаптосомах і  $4.83 \pm 0.40$  нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну в синаптосомах при наявності НА-МП. Обидва зменшення статистично істотні при n = 6 і рівні значимості  $P \le 0.05$  (рис. 1).

На противагу цьому сам МП, доданий до синаптосом, істотно не змінював початкову швидкість накопичення L-[<sup>14</sup>C]глутамату (10 мкМ) і його акумуляцію за 10 хв.

Наноалмази самі по собі було випробувано у наступній серії експериментів. Було показано, що НА зменшують початкову швидкість (на 20 %) і акумуляцію L-[<sup>14</sup>C]глутамату (на 40 %) у синаптосомах. При наявності НА початкова швидкість накопичення L-[<sup>14</sup>C]глутамату дорівнювала 2.26 ± 0.18 нмоль·хв<sup>-1</sup>мг<sup>-1</sup> протеїну, а акумуляція за 10 хв — 5.55 ± 0.44 нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну. Такі зміни також виявляються статистично достовірними при n = 6 і рівні значимості  $P \le 0.05$  (рис. 1).

Таким чином, НА як складова частина аналогу НА-МП зберегли здатність впливати на накопичення L-[<sup>14</sup>C]глутамату.

*Експерименти з використанням [<sup>3</sup>H] ГАМК.* Транспортери ГАМК (а також транспортери біогенних моноамінів і гліцину) належать до іншої родини транспортерів, ніж глутаматні, а саме до родини SLC6, тоді як глутаматні транспортери належать до родини SLC1. Початкова швидкість



**Рис. 1.** Накопичення L-[<sup>14</sup>C]глутамату нервовими терміналями головного мозку впродовж 1, 2, 10 хв при наявності аналогу марсіанського пилу (МП) у концентрації 2 мг/мл; наноалмазів (НА) у концентрації 2 мг/мл та вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу (НА-МП) у концентрації 2 мг/мл. Зірочками відмічено значення, що суттєво відрізняються від контрольних на рівні значимості  $P \le 0.05$ 



**Рис. 2.** Накопичення [<sup>3</sup>H]ГАМК нервовими терміналями головного мозку впродовж 1 і 5 хв при наявності МП, НА і НА-МП у тих же концентраціях (зірочки — рівень значимості  $P \le 0.001$ )

накопичення [<sup>3</sup>H]ГАМК і акумуляція [<sup>3</sup>H]ГАМК протягом 5 хв у синаптосомах при наявності НА-МП зменшувалася на 75 % і 80 % відповідно (рис. 2). Початкова швидкість дорівнювала 149.4 ± 5.3 пмоль·хв<sup>-1</sup>мг<sup>-1</sup> протеїну в контролі і 38.5 ± 4.3 пмоль·хв<sup>-1</sup>мг<sup>-1</sup> білка при наявності НА-МП. Акумуляція [<sup>3</sup>H]ГАМК за 5 хв дорівнювала 432.0 ± 20.0 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну в контрольних синаптосомах і 73.44 ± 10.00 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну в синаптосомах при наявності НА-МП. Ці зміни суттєві при n = 6 і рівні значимості  $P \le 0.001$ .



*Рис. 3.* Позаклітинний рівень L-[<sup>14</sup>C]глутамату у синаптосомах після попередньої інкубації з МП, НА і НА-МП у тих же концентраціях (зірочки — рівень значимості  $P \le 0.001$ )



*Рис.* 4. Те ж для [<sup>3</sup>H]ГАМК (зірочки — рівень значимості  $P \le 0.05$ )

На відміну від НА-МП, сам МП, доданий до синаптосом, істотно не змінював ні початкову швидкість накопичення  $[^{3}H]\Gamma AMK$ , ні її акумуляцію за 5 хв.

Дослідження здатності НА впливати на накопичення [<sup>3</sup>H]ГАМК виявили значне зменшення (на 65 % і 80 %) початкової швидкості накопичення та акумуляції [<sup>3</sup>H]ГАМК синаптосомами, що дорівнювали 53.71 ± 5.64 пмоль·хв<sup>-1</sup>мг<sup>-1</sup> протеїну і 98.5 ± 10.1 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну ( $P \le 0.001$ , n = 6) відповідно (рис. 2).

Таким чином, здатність НА впливати на накопичення [<sup>3</sup>H]ГАМК зберігалась навіть тоді, коли вони стали частиною аналогу НА-МП.
Ефекти НА-МП на позаклітинний рівень L-[<sup>14</sup>C]глутамату і [<sup>3</sup>H]ГАМК у препаратах нервових закінчень. Підтримка певного позаклітинного рівня глутамату і ГАМК є дуже важливою для синаптичної передачі, тому що зміни в цьому рівні призводять до дисбалансу збуджувальних/гальмівних сигналів і викликають серйозні нейрологічні наслідки. Позаклітинний рівень нейромедіаторів визначається як баланс між їхнім накопиченням та вивільненням. Зниження накопичення нейромедіаторів призводить до збільшення їхнього позаклітинного рівня, однак спостерігаються і деякі винятки.

Експерименти з використанням L-[<sup>14</sup>C]глутамату. Як показано на рис. 3, НА і НА-МП викликали значне збільшення (більш ніж удвічі) позаклітинного рівня L-[<sup>14</sup>C] глутамату в синаптосомальній суспензії — від 0.185 ± 0.010 нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну в контролі до 0.415 ± 0.027 нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну і 0.496 ± 0.032 нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну відповідно (P < 0.001, n = 6). Один марсіанський пил не впливав на цей параметр, який дорівнював 0.208 ± 0.021 нмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну (рис. 3).

Таким чином, НА-МП значно збільшував позаклітинний рівень L-[<sup>14</sup>C]глутамату в синаптосомальній суспензії, і цей ефект реалізовувався внаслідок впливу НА.

*Експерименти з використанням* [<sup>3</sup>*H*]ГАМК. У цій серії експериментів позаклітинний рівень [<sup>3</sup>H]ГАМК оцінювався у препараті синаптосом при наявності МП, НА, НА-МП у концентрації 2 мг/мл. Було показано, що сам по собі симулянт МП не призводив до збільшення позаклітинного рівня [<sup>3</sup>H]ГАМК у синаптосомальній суспензії, який дорівнював 126.55 ± 3.13 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну в контролі і 138.47 ± 13.10 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну при наявності аналога МП (рис. 4).

Так само, як і у експериментах з L-[<sup>14</sup>C]глутаматом, НА і НА-МП значно збільшували (більш ніж на третину) позаклітинний рівень [<sup>3</sup>H]ГАМК у синаптосомальній суспензії, який складав 163.25 ± ±8.14 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну і 184.78 ± 10.33 пмоль·мг<sup>-1</sup> протеїну відповідно (P < 0.05, n = 6) (рис. 4).

Таким чином, було встановлено збільшення позаклітинного рівня [<sup>3</sup>H]ГАМК у синаптосомальній суспензії при наявності аналога НА-МП, ефект якого був зумовлений НА.

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Приймаючи до уваги літературні дані щодо широкого поширення вуглецю у марсіанських та інших метеоритах і міжзоряному просторі [10, 16], ми модифікували неорганічний аналог марсіанського пилу, додаючи до нього наноалмази. Розмір частинок наноалмазів становив приблизно 4 нм, отже одна частинка складалася приблизно з 12 тис. атомів вуглецю, з них 3 тис. були поверхневими. Наночастинки утворюються ядром алмазу та поверхневим шаром, що складається з вуглецю з адсорбованими функціональними групами, переважно кисеньвмісними [18].

Наші дослідження були зосереджені на аналізі впливу модифікованого аналога марсіанського пилу, що містив наноалмази (НА-МП) на Na<sup>+</sup>залежне накопичення глутамату та ГАМК нервовими терміналями головного мозку, яке є одним з найважливіших характеристик глутамат- та ГАМК-ергічної передачі [3, 9, 11]. Ми показали значне зниження початкової швидкості накопичення та акумуляції, а також збільшення позаклітинного рівня L-[<sup>14</sup>C]глутамату (рис. 1, 3) та [<sup>3</sup>H]ГАМК (рис. 2, 4) в нервових терміналях.

Таким чином, вуглецевовмісний аналог марсіанського пилу значною мірою впливає на ключові характеристики збуджувальної та гальмівної нейропередачі, що призводить до порушення балансу між збуджувальними/гальмівними сигналами. Неорганічний компонент аналога марсіанського пилу, оброблений ультразвуком, що містив мінорну фракцію наночастинок розміром 50-60 нм, майже не впливав на накопичення та позаклітинний рівень обох нейромедіаторів у нервових терміналях. Було показано, що ефект вуглецевовмісного аналога марсіанського пилу зумовлений переважно його вуглецевою, а не неорганічною складовою. Показано, що аналог марсіанського пилу не спричинює змін мембранного потенціалу, тоді як наноалмази здатні змінювати мембранний потенціал синаптосом. Через це було зроблено припущення, що порушення транспорту нейромедіаторів, спричинені аналогом марсіанського пилу, збагаченого наноалмазами, можуть відбуватися внаслідок хоча б незначної деполяризації мембрани.

Таким чином, збагачення неорганічного аналога марсіанського пилу вуглецевою складовою призводить до виникнення нейротоксичності. З іншого боку, було показано, що неорганічний компонент, а саме аналог марсіанського пилу, не змінює негативного впливу вуглецевого компонента на глутамат- та ГАМК-ергічну нейротрансмісію, а отже, токсична дія вуглецевих структур у складі марсіанського пилу може бути значно більшою у порівнянні з його неорганічними компонентами.

Здатність вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу зменшувати початкову швидкість транспортерзалежного накопичення глутамату та ГАМК, що спричинює значне збільшення позаклітинного рівня обох нейромедіаторів, може розглядатися як ключовий фактор, що зумовлює розвиток нейрологічних порушень. Певна концентрація позаклітинного глутамату та ГАМК врівноважує процеси збудження та гальмування у процесі нейропередачі, а викликане аналогом збільшення позаклітинного рівня обох нейромедіаторів може викликати порушення такої рівноваги.

Таким чином, створено методику виготовлення вуглецевовмісного аналога марсіанського пилу та оцінено його токсичний ефект на нервову систему. Показано, що нейротоксичність вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу пов'язана виключно з його вуглецевим компонентом, при цьому неорганічна складова пилу залишається інертною.

Дякуємо за надання препарату наноалмазів О. В. Лещенко, провідному інженеру Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

Роботу виконано за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 р. та Державного космічного агентства України.

- Abbott N. J. Inflammatory mediators and modulation of blood-brain barrier permeability // Cell. Mol. Neurobiol. – 2000. – 20. – P. 131–147.
- Bogatyreva G. P., Marinich M. A., Oleinik G. S., et al. The effect of the methods of recovering diamond nanopowders on their physicochemical properties // J. Superhard Mater. - 2011. - 33. - P. 208-216.
- 3. *Borisova T., Kasatkina L., Ostapchenko L.* The proton gradient of secretory granules and glutamate transport in

blood platelets during cholesterol depletion of the plasma membrane by methyl- $\beta$ -cyclodextrin // Neurochem. Int. – 2011. – **59**. – P. 965–975.

- Borisova T. A., Krisanova N. V. Presynaptic transportermediated release of glutamate evoked by the protonophore FCCP increases under altered gravity conditions // Adv. Sp. Res. – 2008. – 42. – P. 1971–1979.
- Borisova T., Krisanova N., Sivko R., Borysov A. Cholesterol depletion attenuates tonic release but increases the ambient level of glutamate in rat brain synaptosomes // Neurochem. Int. – 2010. – 56. – P. 466–478.
- Bourdon J. A., Saber A. T., Jacobsen N. R., et al. Carbon black nanoparticle instillation induces sustained inflammation and genotoxicity in mouse lung and liver // Part. Fibre Toxicol. – 2012. – 9. – P. 5.
- Chatterjee A., Wang A., Lera M., Bhattacharya S. Lunar soil simulant uptake produces a concentration-dependent increase in inducible nitric oxide synthase expression in murine RAW 264. 7 macrophage cells // J. Toxicol. Environ. Health. A. – 2010. – 73. – P. 623–626.
- Cotman C. W. Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions // Methods Enzymol. – 1974. – 31. – P. 445–452.
- Danbolt N. C. Glutamate uptake // Prog. Neurobiol. 2001. – 65. – P. 1–105.
- Garai J., Haggerty S. E., Rekhi S., Chance M. Infrared absorption investigations confirm the extraterrestrial origin of carbonado diamonds // Astrophys. J. – 2006. – 653. – P. 153–156.
- Krisanova N., Sivko R., Kasatkina L., Borisova T. Neuroprotection by lowering cholesterol: A decrease in membrane cholesterol content reduces transporter-mediated glutamate release from brain nerve terminals // Biochim. Biophys. Acta - Mol. Basis Dis. - 2012. - 1822. -P. 1553-1561.
- Lam C.-W., James J. T., McCluskey R., et al. Pulmonary toxicity of simulated lunar and martian dusts in mice: I. Histopathology 7 and 90 days after intratracheal instillation // Inhal. Toxicol. – 2002. – 14. – P. 901–916.
- Lam C.-W., James J. T., Latch J. N., et al. Pulmonary toxicity of simulated lunar and martian dusts in mice: II. Biomarkers of acute responses after intratracheal instillation // Inhal. Toxicol. – 2002. – 14. – P. 917– 928.
- Larson E., Howlett B., Jagendorf A. Artificial reductant enhancement of the Lowry method for protein determination // Anal. Biochem. – 1986. – 155. – P. 243–248.
- Linnarsson D., Carpenter J., Fubini B., et al. Toxicity of lunar dust // Planet. Space Sci. – 2012. – 74. – P. 57–71.
- Lin Y., Goresy A. El, Hu S., et al. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organicbearing fluids on Mars // Meteorit. Planet. Sci. – 2014. – 49. – P. 2201–2218.

- Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., et al. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain // Inhal. Toxicol. – 2004. – 16. – P. 437–445.
- Orel V. E., Shevchenko A. D., Bogatyreva G. P., et al. Magnetic characteristics and anticancer activity of a nanocomplex consisting of detonation nanodiamond and doxorubicin // J. Superhard Mater. – 2012. – 34. – P. 179–185.
- Rehders M., Grosshäuser B. B., Smarandache A., et al. Effects of lunar and mars dust simulants on HaCaT keratinocytes and CHO-K1 fibroblasts // Adv. Sp. Res. – 2011. – 47. – P. 1200–1213.
- Wallace W. T., Taylor L. A., Liu Y., et al. Lunar dust and lunar simulant activation and monitoring // Meteorit. Planet. Sci. Arch. – 2009. – 44. – P. 961–970.

Стаття надійшла до редакції 13.02.17

#### REFERENCES

- Abbott N. J. Inflammatory mediators and modulation of blood-brain barrier permeability. *Cell. Mol. Neurobiol.*, 20, 131–147 (2000).
- Bogatyreva G. P., Marinich M. A., Oleinik G. S. et al. The effect of the methods of recovering diamond nanopowders on their physicochemical properties. J. Superhard Mater., 33, 208–216 (2011).
- Borisova T., Kasatkina L., Ostapchenko L. The proton gradient of secretory granules and glutamate transport in blood platelets during cholesterol depletion of the plasma membrane by methyl- -cyclodextrin. *Neurochem. Int.*, 59, 965–975 (2011).
- Borisova T. A., Krisanova N. V. Presynaptic transportermediated release of glutamate evoked by the protonophore FCCP increases under altered gravity conditions. Adv. Sp. Res., 42, 1971–1979 (2008).
- Borisova T., Krisanova N., Sivko R., Borysov A. Cholesterol depletion attenuates tonic release but increases the ambient level of glutamate in rat brain synaptosomes. *Neurochem. Int.*, 56, 466–478 (2010)
- Bourdon J. A., Saber A. T., Jacobsen N. R., et al. Carbon black nanoparticle instillation induces sustained inflammation and genotoxicity in mouse lung and liver. *Part. Fibre Toxicol.*, 9, 5 (2012).
- Chatterjee A., Wang A., Lera M., Bhattacharya S. Lunar soil simulant uptake produces a concentration-dependent increase in inducible nitric oxide synthase expression in murine RAW 264.7 macrophage cells. J. Toxicol. Environ. Health. A., 73, 623–626 (2010).

- Cotman C. W. Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions. *Methods Enzymol.*, 31, 445– 452 (1974).
- 9. *Danbolt N. C.* Glutamate uptake. *Prog. Neurobiol.*, **65**, 1–105 (2001).
- Garai J., Haggerty S. E., Rekhi S., Chance M. Infrared absorption investigations confirm the extraterrestrial origin of carbonado diamonds. Astrophys. J., 653, 153– 156 (2006).
- Krisanova N., Sivko R., Kasatkina L., Borisova T. Neuroprotection by lowering cholesterol: A decrease in membrane cholesterol content reduces transportermediated glutamate release from brain nerve terminals. *Biochim. Biophys. Acta – Mol. Basis Dis.*, 1822, 1553– 1561 (2012).
- Lam C. -W., James J. T., McCluskey R., et al. Pulmonary toxicity of simulated lunar and martian dusts in mice: I. Histopathology 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Inhal. Toxicol.*, 14, 901–916 (2002).
- Lam C. -W., James J. T., Latch J. N., et al. Pulmonary toxicity of simulated lunar and martian dusts in mice: Ii. Biomarkers of acute responses after intratracheal instillation. *Inhal. Toxicol.*, 14, 917–928 (2002).
- 14. Larson E., Howlett B., Jagendorf A. Artificial reductant enhancement of the Lowry method for protein determination. Anal. Biochem., 155, 243–248 (1986).
- Linnarsson D., Carpenter J., Fubini B., et al. Toxicity of lunar dust. Planet. Space Sci., 74, 57–71 (2012).
- 16. Lin Y., Goresy A. El, Hu S., et al. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organicbearing fluids on Mars. *Meteorit. Planet. Sci.*, 49, 2201– 2218 (2014).
- Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., et al. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. Inhal. Toxicol., 16, 437–445 (2004).
- Orel V. E., Shevchenko A. D., Bogatyreva G. P., et al. Magnetic characteristics and anticancer activity of a nanocomplex consisting of detonation nanodiamond and doxorubicin. J. Superhard Mater., 34, 179–185 (2012).
- Rehders M., Grosshäuser B. B., Smarandache A., et al. Effects of lunar and mars dust simulants on HaCaT keratinocytes and CHO-K1 fibroblasts. Adv. Sp. Res., 47, 1200–1213 (2011).
- Wallace W. T., Taylor L. A., Liu Y., et al. Lunar dust and lunar simulant activation and monitoring. *Meteorit. Planet. Sci. Arch.*, 44, 961–970 (2009).

А. О. Пастухов, М. В. Дударенко, М. А. Галкин, Н. В. Крысанова, А. Г. Назарова, Н. Г. Позднякова, Т. А. Борисова

Институт биохимии им. А. В. Палладина Национальной академии наук Украины, Киев

## СОЗДАНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО АНАЛОГА МАРСИАНСКОЙ ПЫЛИ И ОЦЕНКА ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ТРАНСПОРТ НЕЙРОМЕДИАТОРОВ НЕРВНЫМИ ТЕРМИНАЛЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗГА КРЫС

Углерод широко распространен в марсианской пыли, метеоритах и межзвездном пространстве. В рамках данного исследования разработан новый углеродсодержащий аналог марсианской пыли, состоящий из неорганического аналога марсианской пыли, полученного из вулканического пепла (JSC, Mars-1A, ORBITEC, США) и углерода (наноалмазы). Была проведена оценка эффекта этого аналога на ключевые характеристики синаптической нейротрансмиссии. Впервые показано, что углеродсодержащий аналог марсианской пыли, созданный на основе наноалмазов, существенно снижает начальную скорость накопления и увеличивает внеклеточный уровень нейромедиаторов L-[<sup>14</sup>C]глутамата и [<sup>3</sup>H]ГАМК (у-аминомасляной кислоты) в нервных терминалях головного мозга крыс. Эффект углеродсодержащего аналога марсианской пыли связан исключительно с активностью его углеродной составляющей, а не с неорганическими компонентами. Наиболее важным является то, что углеродный компонент нативной марсианской пыли может оказывать вредное воздействие на внеклеточный гомеостаз нейромедиаторов в ЦНС, что приводит к дисбалансу возбуждающих/ тормозных сигналов и серьезным нейрологическим последствиям. Таким образом, токсическое воздействие углеродных структур в составе нативной марсианской пыли может превышать влияние неорганических компонентов.

Ключевые слова: аналог марсианской пыли, транспорт глутамата, транспорт ГАМК, глутаматергическая нейротрансмиссия, ГАМК-эргическая нейротрансмиссия, нервные терминали головного мозга.

A. O. Pastukhov, M. V. Dudarenko, M. O. Galkin, N. V. Krisanova, A. G. Nazarova, N. G. Pozdnyakova, T. O. Borisova

Palladin Institute of Biochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

DEVELOPMENT OF CARBON-CONTAINING MARTIAN DUST ANALOGUE AND ASSESSMENT OF ITS EFFECTS ON THE KEY CHARACTERISTICS OF THE SYNAPTIC NEUROTRANSMISSION IN RAT BRAIN NERVE TERMINALS

Carbon is widely distributed in the Martian dust, meteorites and interstellar space. In this study, we prepared carbon-containing Martian dust analogue, which consists of inorganic Martian dust simulant derived from volcanic ash (JSC, Mars-1A, ORBITEC, USA) and carbon (nanodiamonds). The aim of the study was to analyze the effects of carbon-containing Martian dust analogue on the key characteristics of the synaptic neurotransmission. It was shown that the carbon-containing Martian dust analogue enriched with nanodiamonds significantly reduced the initial rate of accumulation and increased extracellular levels of neurotransmitters L-[<sup>14</sup>C] glutamate and  $[^{3}H]GABA$  ( $\gamma$ -aminobutyric acid) in isolated rat brain nerve terminals. These effects of carbon-containing Martian dust analogue were mainly associated to the activity of its carbon component, but not to inorganic components. So, carbon component of native Martian dust can have deleterious effects on extracellular glutamate and GABA homeostasis in the CNS, and so glutamate- and GABA-ergic neurtransmission, disballansing exitatory and inhibitory signals. Thus, the toxic effects of carbon structures in native Martian dust, soil, and meteorites for human health may be greater than the effect of the inorganic components.

*Keywords:* Martian dust analogue, glutamate transport, GABA transport, glutamatergic neurotransmission, GABA-ergic neurotransmission, brain nerve terminals.

doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2017.02.041 VДK 551.513.11:551.510.534

# В. Ю. Могильчак <sup>1</sup>, Г. П. Міліневський <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

# ВАРІАЦІЇ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ В АТМОСФЕРІ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

Проаналізовано просторовий та часовий розподіл загального вмісту озону (3BO) над територією України (43.5... 52.2°N, 22...42°E). Виявлено коротко- та довгострокові зміни 3BO на основі супутникових спостережень, що проводились в останні десятиліття (1979—2014 рр.) спектрометрами TOMS та OMI. Відзначено, що для короткострокових (сезонних) змін максимум 3BO припадає на весняні місяці (березень — квітень), мінімум — на осінні (жовтень — листопад). Довгострокові зміни відповідають зменшенню 3BO з 1970 до 1990-х рр., але темп зниження 3BO уповільнився на початку XXI ст. Виявлено неоднорідність просторового розподілу загального вмісту озону з широтою, а саме його зменшення у напрямку з півночі на південь України.

Ключові слова: озон, варіації, довгострокові зміни, супутникові спостереження, спектрометри

## вступ

Атмосферний озон відіграє важливу роль в регіональних та глобальних змінах клімату, приземний озон згубно впливає на здоров'я людини і навколишнє середовище. Тому спостереження змін загального вмісту озону (ЗВО) надають важливу інформацію для вивчення фізичних процесів у атмосфері Землі [1]. На даний час дистанційні дослідження загального вмісту озону в атмосфері Землі поділяються на наземні [2, 5, 8] та супутникові спостереження [7, 10, 11, 14]. Переважно використовується властивість озону поглинати та розсіювати сонячне ультрафіолетове випромінювання у діапазоні 300...340 нм. При наземних та супутникових вимірюваннях розрахунок поглинання проводиться на основі експоненціального закону Бугера — Ламберта — Бера.

Для визначення ЗВО також відіграє велику роль розсіяння світла на атмосферному аерозолі. Сезонний хід вмісту озону вивчено досить добре як за локальними наземними, так і за супутниковими спостереженнями [4, 5, 7]. Проте у першому випадку нерівномірність географічного покриття призводить до зосередження уваги на регіонах з найбільш густою сіткою станцій. У другому випадку масиви глобальних даних для аналізу сезонних змін ЗВО зазвичай подають у вигляді зонально усереднених часових рядів. Таке представлення супутникових вимірювань добре відтворює широтну залежність сезонного ходу ЗВО, але при цьому втрачаються його регіональні особливості [7, 10]. Порівняння обох видів спостережень на прикладі станції Київ — Голосіїв дає змогу вважати, що різниця між супутниковими і наземними даними обумовлюється недоліками алгоритмів обчислення ЗВО [10, 11].

<sup>©</sup> В. Ю. МОГИЛЬЧАК, Г. П. МІЛІНЕВСЬКИЙ, 2017

Проте будь-який з методів не надає невичерпну інформацію щодо сезонного та просторового ходу ЗВО.

Починаючи з 1970-х р., діють програми супутникового моніторингу, які забезпечують неперервне накопичення даних про глобальний розподіл та просторово-часові варіації ЗВО для аналізу та моніторингу стану озонового шару нашої планети. Наземні спостереження загального вмісту озону в Україні були розпочаті у 1973-1974 рр. на станціях Бориспіль, Карадаг, Одеса, Львів за допомогою озонометрів M-124 [2, 3]. Для відновлення розподілу ЗВО над територією України, особливо в її східній частині, де інструментальні наземні спостереження не проводились, залучалась інформація, отримана зі супутникового приладу TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). У 1990 р. було відкрито ще дві озонометричні станції: в Києві та Богуславі, де синхронно вимірювались значення загального вмісту озону в атмосфері. З 2010 р. вимірювання ЗВО було розпочато за допомогою спектрофотометра Добсона [7, 11, 13].

Дані про вміст озону, одержані в Україні, мають типові для середньоширотної зони максимальні рівні ЗВО у зимово-весняний період та мінімальні — восени. Сезонні коливання, що спостерігаються, значною мірою визначаються рівнем накопичення стратосферного озону, спричиненого зимовим посиленням меридіонального переносу озону в стратосфері — циркуляцією Брюера — Добсона (ЦБД) та темпом наступної фотохімічної релаксації, яка триває до осені. Завдяки ЦБД збагачені озоном стратосферні повітряні маси рухаються з тропіків у бік полюса та осідають над позатропічними широтами. Це призводить до утворення додатного градієнта ЗВО між тропічним та полярним регіонами [4, 7], що відіграє важливу роль у формуванні клімату даної області. Сезонні зміни концентрації озону у стратосфері, внаслідок яких температурний режим стратосфери зазнає змін, впливають на інтенсивність зональної циркуляції у стратосфері, на поширення та руйнування планетарних хвиль, а також на стратосфернотропосферний обмін у певних регіонах в залежності від сезону [12]. Хоча взаємозв'язки між змінами вмісту озону та змінами клімату інтенсивно досліджуються та моделюються останнім часом, але досі залишається невизначеність оцінок ролі окремих факторів, зокрема, динамічних та хімічних процесів в атмосфері. Останній фактор, через вплив озону як парникового газу на радіаційний баланс тропосфери, безпосередньо причетний до формування як регіональних, так і глобальних кліматичних змін.

Метою даної роботи було дослідження часових та просторових змін загального вмісту озону над територією України в період 1979—2014 рр. на основі супутникових даних.

### ДАНІ ТА МЕТОД АНАЛІЗУ

Для аналізу були використані супутникові спостереження загального вмісту озону спектрометрами TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) за 1979—2005 рр., що були встановлені на супутниках Nimbus-7 (11.1978—05.1993), Earth Probe (07.1996—11.2005), та приладом OMI (Ozone Monitoring Instrument) за 2004—2014 рр., що був встановлений на супутнику AURA (http:// оzoneaq.gsfc.nasa.gov). Розрахунок та аналіз проводились за даними, визначеними алгоритмом TOMS v.8 [14]. Дослідження просторових змін ЗВО в атмосфері над Україною виконано у прямокутній області з утвореною в ній сіткою з дискретністю  $1.0^{\circ} \times 1.25^{\circ}$  (TOMS) та  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  (OMI) по довготних та широтних смугах відповідно.

Таким чином, було отримано поле змінних значень загального вмісту озону у вузлах сітки та було розраховано просторові і часові зміни ЗВО в даній області.

Для інтерпретації варіацій часового і просторового розподілу ЗВО для кожної смуги широти та довготи було використано незалежний коефіцієнт відносної варіації CRV (coefficient of relative variation), що розраховувався по формулі [5, 6]:

$$CRV_{i,a} = 100 \frac{TOC_{i,a}^{\max} - TOC_{i,a}^{\min}}{TOC_{i,a}^{mean}}$$

де *ТОС*<sub>*i,a*</sub><sup>max</sup>, *ТОС*<sub>*i,a*</sub><sup>min</sup>, *ТОС*<sub>*i,a*</sub><sup>mean</sup> — максимум, мінімум та середнє добове значення ЗВО відповідно. За допомогою розрахунку коефіцієнта відносної варіації ми зможемо порівняти добові



*Рис.* 1. Середньомісячні зміни коефіцієнта відносних варіацій ЗВО над різними точками території України за 2005 і 2014 рр.



зміни просторових варіацій загального вмісту озону, відкинувши вплив часових змін.

Дослідження часових змін ЗВО зводилося до дослідження короткострокових (сезонних) та довгострокових змін ЗВО. Було проаналізовано сезонні зміни ЗВО з 2010 по 2014 рр. та річні зміни з 1979 р. по 2014 р. Урахування впливу сезонних варіацій ЗВО на довгострокові зміни було розраховано за формулою [5]

$$D_n(t) = m + n\sin wt + o\cos wt,$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2

де t — місяць року, m — зміщення,  $n \sin wt + o \cos wt$  — складова, що описує сезонний хід ЗВО,  $w = 2\pi / 12$  — константа.

### РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Результати, отримані для просторових варіацій для 2005 р. та 2014 р., наведено на рис. 1, де зображено залежність коефіцієнта *CRV* від місяця року для різних широт досліджуваної області. Як видно, на всій території України у 2014 рік спостері-



Рис. 3. Довгострокові зміни ЗВО над територією України



*Рис.* 4. Довгострокові зміни ЗВО над територією України з виключеними сезонними варіаціями: квадратики — дані TOMS, точки — ОМІ, трикутники — моменти вивержень

гались два максимуми *CRV* — у січні та березні, тоді як у 2005 р. максимум варіацій припадав на січень. Значення ЗВО зменшувались з півночі на південь. Це підтверджує вищезазначене накопичення стратосферного озону, спричиненого зимовим посиленням меридіонального переносу озону та темпом наступної фотохімічної релакса-



*Рис. 5.* Усереднені за восьмирічний період значення ЗВО для чотирьох широтних поясів над територією України:  $1 - 43.5^{\circ}, 2 - 46.5^{\circ}, 3 - 49.5^{\circ}, 4 - 52.5^{\circ}$ N

	v	
Дата виверження	Місце знаходження	Назва вулкану
18 травня 1980 р.	Штат Вашингтон, США	Сент-Геленс
29 березня 1982 р.	Мексика	Ель-Чічон
12—13 листопада 1985 р.	Колумбія	Невадо-дель-Руїс
9—15 червня 1991 р.	О. Лусон, Філіппіни	Пінатубо
30 червня 1997 р.	Мексика	Попокатепетль
14 березня 2000 р.	Камчатка, Росія	Безіменний
14—19 грудня 2000 р.	Мексика	Попокатепетль
12 червня 2009 р.	О. Матуа, Росія	пік Саричева
14 квітня 2010 р.	Ісландія	Ейяфьятлайокудль
21 травня 2011 р.	Ісландія	Грімсвотн
5 червня 2011 р.	Чилі	Пуйеуе
12 червня 2011 р.	Еритрея	Набро

Найбільш потужні виверження вулканів на Землі наприкінці IXX — початку XX ст.

ції, яка триває до осені, та утворення градієнта між тропічним та полярним регіонами. Поведінка коефіцієнта *CRV* демонструє загальновідомі значні варіації вмісту озону у зимові та весняні місяці і малу змінність наприкінці літа у серпні.

Для короткострокових варіацій було отримано залежності ЗВО від широти, що наведені на рис. 2. Для сезонних варіацій загального вмісту озону спостерігається приблизно однаковий сезонний хід ЗВО за останні п'ять років, який має чітко визначений стійкий максимум ЗВО у перехідний період зима — весна, а саме у лютому — квітні.

Зміни ЗВО протягом останніх трьох десятиліть (довгострокові зміни) наведені на рис. 3. Перерва в даних після 1991 р. пов'язана з перериванням надійних вимірювань на супутнику «Метеор-3» (08.1991—11.1994). З рис. 3 видно, що зменшення середньорічних значень ЗВО в атмосфері над Україною з 1970-х по 1990-ті рр. уповільнилось, і за даними ОМІ зменшення ЗВО є незначним, що підтверджується даними [3].

Різницю між змінами ЗВО протягом останніх трьох десятиліть та сезонними варіаціями наведено на рис. 4. У таблиці також наведено дати найбільш потужних вивержень вулканів наприкінці ІХХ — на початку ХХ ст., які, можливо, відповідають за збільшення амплітуди варіацій ЗВО в останні три десятиліття. Проаналізувавши час виверження вулканів та результати спостережень ЗВО, можна зробити висновок про зменшення вмісту озону в атмосфері, яке може бути спричинене потужними виверженням вулканів [9].

На рис. 5 наведено усереднені за восьмирічний період значення ЗВО для чотирьох широтних поясів над територією України.

За даними довгострокових змін ЗВО (рис. 5) протягом 1979—2014 рр. спостерігається зменшення кількості озону на 18 ОД за 35 років, що складає близько 6 % втрат озону у стратосфері. Видно також широтну залежність значень ЗВО при переході від північних широт до південних. За усередненими даними значення різниці ЗВО між північним поясом і південним поясом складає близько —4 ОД. Це відповідає загальному широтному розподілу озону в середньоширотній області, але таку залежність ЗВО над територією України помічено вперше.

## ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Проведено аналіз часових та просторових варіацій загального вмісту озону над територією України за даними супутникових інструментів TOMS та OMI, отриманих протягом останніх трьох десятиліть. За результатами обробки даних для широтних поясів сезонний максимум ЗВО припадає на зимово-весняні місяці (лютий квітень), мінімум — на осінні (вересень — листопад). Для значень ЗВО спостерігаються два максимуми коефіцієнта відносної варіації *CRV* у січні та березні над всією територією України. Виявлено помітну широтну залежність значень 3BO — зменшення вмісту озону при переході від північних широт до південних. За усередненими даними значення різниці ЗВО між північними районами і південними складає близько –4 ОД, що загалом відповідає широтному розподілу озону в середньоширотній області північної півкулі. Довгострокові зміни ЗВО відповідають зменшенню загального вмісту озону в 1970-1990-ті роки, але темп зменшення уповільнився на початку 2000-х рр.

Роботу виконано за підтримки проекту 16БФ051-02 Київського національного університету імені Тараса Шевченка, теми 369Кт «Аерозоль-UA» (NAS) Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012— 2016 рр., гранту Ф73/115-2016 Державного фонду фундаментальних досліджень. Дані супутникових спостережень загального вмісту озону інструментами TOMS та OMI з веб-сторінки Ozone Processing Team, NASA Goddard Space Flight Center http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov.

- 1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. — 288 с.
- 2. Дворецька В. Особливості динаміки загального вмісту озону в сучасний період // Наук. праці УкрНД-ГМІ. — 2012. — Вип. 262. — С. 257—271.
- Ліпінський В. М., Дячук В. А., Бабічеко В. М. Клімат України. Київ: Вид-во Раєвського, 2003. С. 75—77.
- 4. *Chandra S., Varotsos C., Flynn L. E.* The mid-latitude total ozone trends in the Northern Hemisphere // Geophys. Res. Lett. 1996. 23, N 5. P. 555–558. doi:10.1029/96GL00305.

- Chen L., Yu B., Chen Z., et al. Investigating the Temporal and Spatial Variability of Total Ozone Column in the Yangtze River Delta Using Satellite Data: 1978–2013 // Remote Sens. – 2014. – 6. – P. 12527–12543. – doi:10.3390/rs61212527.
- Evtushevsky O. M., Grytsai A. V., Klekociuk A. R., Milinevsky G. P. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring // J. Geophys. Res. – 2008. – 113D, N 7. – doi:10.1029/2008jd009881.
- Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes // Remote Sens. Lett. – 2014. – 5, N 3. – P. 205–212. – http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.201 4.894653.
- Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A. Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996-2005 // Int. J. Remote Sens. – 2008. – 29, N 9. – P. 2675–2683.
- Flentje H., Claude H., Elste T., et al. The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 — detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidarceilometer profiles // Atmos. Chem. Phys. — 2010. — 10. — P. 10085—10092. — doi:10.5194/acp-10-10085-2010.
- Grytsai A., Milinevsky G. SCIAMACHY/Envisat, OMI/ Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station // Int. J. Remote Sens. – 2013. – 34, N 15. – P. 5611–5622..
- Kravchenko V., Evtushevsky A., Grytsai A. Total ozone dependence of the difference between the empirically corrected EP-TOMS and high-latitude station datasets // Int. J. Remote Sens. — 2009. — 30, N 15/16. — P. 4283— 4294.
- Lozitsky V., Grytsai A., Klekociuk A., Milinevsky G. Influence of planetary waves on total ozone column distribution in northern and southern high latitudes // Int. J. Remote Sens. – 2011. – 32, N 11. – P. 3179–3186. – doi:10.1080/01431161.2010.541519.
- Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V. Recent developments of atmospheric research in Ukraine // Adv. Astron. Space Phys. – 2012. – 2, N 2. – P. 114–120.
- 14. Wellemeyer C., Bhartia P. K., Taylor S., et al. Version 8 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) algorithm // Proc. XX Quadrennial Ozone Symp. / Ed. C. Zerefos. – 2004. – Vol. 1. – P. 635–636. – Int. Ozone Comm., Athens. (https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/media/docs/toms\_ algor.pdf)

Стаття надійшла до редакції 20.01.17

#### REFERENCES

- Aleksandrov Je. L., Izrajel'Ju. A., Karol'I. L., Hrgian A. H. The ozone shield Earth and its changes, 288 s. (Gidrometeoizdat, Sankt-Peterburg: 1992) [in Russian].
- Dvorets'ka V. Features of the dynamics of total ozone in modern times. *Nauk. pratsi UkrNDHMI*, Vyp. 262, 257– 271 (2012). [in Ukrainian].
- 3. *Lipins'kyj V. M., Diachuk V. A., Babicheko V. M.* The climate of Ukraine, 75–77 (Vydavnytstvo Raievs'koho, Kyiv, 2003) [in Ukrainian].
- 4. *Chandra S., Varotsos C., Flynn L. E.* The mid-latitude total ozone trends in the Northern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **23** (5), 555–558 (1996).
- Chen L., Yu B., Chen Z., et al. Investigating the temporal and spatial variability of total ozone column in the Yangtze river delta using satellite data: 1978–2013. *Remote Sens.*, 6, 12527–12543 (2014).
- 6. *Evtushevsky O. M., Grytsai A. V., Klekociuk A. R., Milinevsky G. P.* Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring. *J. Geophys. Res.*, **113 (D7)** (2008).
- Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes. *Remote Sens. Lett.*, 5 (N 3), 205–212 (2014).
- Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A. Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996–2005. Int. J. Remote Sens., 29 (N 9), 2675–2683 (2008).
- Flentje H., Claude H., Elste T., et al. The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 — detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar-ceilometer profiles. Atmos. Chem. Phys., 10, 10085–10092 (2010).
- Grytsai A., Milinevsky G. SCIAMACHY/Envisat, OMI/ Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station. Int. J. Remote Sens., 34 (15), 5611-5622 (2013).
- Kravchenko V., Evtushevsky A., Grytsai A. Total ozone dependence of the difference between the empirically corrected EP-TOMS and high-latitude station datasets. *Int. J. Remote Sens.*, **30** (15/16), 4283–4294 (2009).
- Lozitsky V., Grytsai A., Klekociuk A., Milinevsky G. Influence of planetary waves on total ozone column distribution in northern and southern high latitudes. Int. J. Remote Sens., 32 (11), 3179–3186 (2011).
- Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V. Recent developments of atmospheric research in Ukraine. Adv. Astron. Space Phys., 2 (2), 114–120 (2012).

- Wellemeyer C., Bhartia P. K., Taylor S., et al. Version 8 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) algorithm. Proc. XX Quadrennial Ozone Symp. (Ed. C. Zerefos), 1, 635–636 (2004). – Int. Ozone Comm., Athens. (https:// ozoneaq.gsfc.nasa.gov/media/docs/toms algor.pdf).
- В. Ю. Могильчак<sup>1</sup>, Г. П. Милиневский<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

<sup>1, 2</sup> Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

## ВАРИАЦИИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ

Проанализированы пространственное и временное распределение общего содержания озона (ОСО) над территорией Украины (43.5...2.2°N, 22...42°E). Обнаружены кратко- и долгосрочные изменения на основе спутниковых наблюдений, проводимых в последние десятилетия (1979—2014 гг.) спектрометрами TOMS и OMI. Отмечено, что для краткосрочных (сезонных) изменений максимум ОСО приходится на весенние месяцы (март — апрель), минимум — на осенние (октябрь — ноябрь). Долгосрочные изменения ОСО соответствуют уменьшению ОСО с 1970-х по 1990-е гг., но темп снижения ОСО замедлился в начале XXI века. Обнаружены неоднородность пространственного распределения с широтой, а именно его уменьшение в направлении с севера на юг Украины. *Ключевые слова:* озон, вариации, долгосрочные изменения, спутниковые наблюдения, спектрометры.

- V. Y. Mogylchak<sup>1</sup>, G. P. Milinevskiy<sup>1,2</sup>
- <sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv
- <sup>1,2</sup> Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

### VARIATIONS OF TOTAL OZONE IN THE ATMOSPHERE OVER THE TERRITORY OF UKRAINE

In the paper, we analyze the spatial and temporal distribution of total ozone column (TOC) over the territory of Ukraine  $(43.5-52.2^{\circ}N, 22-42^{\circ}E)$ . The presence of short- and longterm total ozone changes was detected based on satellite observations, conducted in the last decades (1979–2014) by spectrometers TOMS and OMI. It was noted that for shortterm (seasonal) changes, the maximum of TOC falls on the spring months (March – April), the minimum one has been observed in the autumn (October – November). Long-term changes of TOC correspond to its decrease from the 1970s to the 1990s, but the rate of decline slowed down at the beginning of the 21st century. Heterogeneity of TOC spatial distribution with latitude was detected, that means TOC reduction in the direction from north to south of Ukraine.

*Keywords:* ozone variations, long-term changes, the satellite observation spectrometers.

doi: https://doi.org/10.15407/knit2017.02.048

## Г. В. Лизунов

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

# КОММЕНТАРИЙ НА СТАТЬЮ О. Ф. ТЫРНОВА, Ю. П. ФЕДОРЕНКО, В. Л. ДОРОХОВА «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ»

Это письмо в редакцию является комментарием на недавно опубликованную работу [1], посвящённую описанию акустико-гравитационных волн (АГВ) и перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в термосфере Земли. Утверждения авторов работы [1] настолько далеки от действительности, что мы вынуждены выступить с их публичным опровержением. Наша мотивация обусловлена тем, что физики и радиофизики, не являющиеся узкими специалистами по теме статьи, и аспиранты, только готовящиеся стать такими специалистами, воспримут статью [1] как современный обзор, и в своих исследованиях примут за основу высказанные в ней ошибочные положения.

Статья [1] занимает 68 страниц журнального текста и логически состоит из нескольких разнородных частей: обзора литературы об АГВ (слабо увязанного с остальными частями), описания авторской модели АГВ-ПИВ, анализа наблюдений на радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, анализа ряда других наблюдений. (Следует отметить, что сами по себе экспериментальные результаты представляют интерес и, если их очистить от лишних сущностей, заслуживают отдельной публикации). В целом статья написана длинно, не сфокусированно, изобилует неточными, спорными и претенциозными утверждениями, что превращает изучение статьи в поиск крупиц информации «в тоннах словесной руды».

Стержнем работы является парадоксальная авторская концепция распространения АГВ, состоящая в том, что гребни АГВ движутся с различными априори заданными скоростями: первый гребень со скоростью около 11 км/с, второй — 1 км/с, третий — 0.5 км/с и т. д. вплоть до 8-го гребня — 0.09 км/с. Данный подход противоречит основам теории колебаний и волн, поскольку речь идёт не о том, что спектральные составляющие АГВ имеют разные фазовые скорости (дисперсия), а что фиксированные скорости приписываются разным гребням волны (см. с. 10 в [1]). Картина поля АГВ затем рассчитывается как результат простого кинематического перемещения волновых гребней от источника в точку наблюдения. Авторы не пытаются оправдать свой подход физически, а преподносят его в качестве «эмпирической модели», как если бы никакой теории АГВ не существовало. Без математики, без использования представлений о дисперсионном уравнении, фазовых и групповых скоростях, о лучевых траекториях волн в реальной атмосфере — вопросах, разрабатываемых уже более полстолетия, — такая модель выглядит слишком упрощенной.

<sup>©</sup> Г. В. ЛИЗУНОВ, 2017

Более того, теория АГВ основывается на огромном экспериментальном материале, накопленном на протяжении космической эры. Наряду с апробированными данными специалистам известны и «апокрифические» результаты, достоверность которых вызывает сомнение, и которые, в конечном итоге, остались за рамками современной парадигмы АГВ-ПИВ. И вот сюрприз, эмпирическая модель [1] практически не использует данные первого типа (т. е. такие, которые установлены надёжно), а в основных своих моментах калибруется по данным второго типа (большей частью опубликованным в 1960-х годах несколькими группами авторов, занимавшихся наблюдением ионосферных откликов на воздушные ядерные взрывы). Наибольшее неприятие вызывают тезисы о скорости распространения АГВ 11 км/с и гигантских амплитудах этих волн до 80 % возмущения плотности нейтральной атмосферы.

Во всём диапазоне ионосферных высот заряженные компоненты составляют малую добавку к нейтральному газу (так, в максимуме плотности ионосферы, на высоте 250...300 км, ионизация составляет менее 0.1 %). Поэтому, при распространении АГВ, колебания нейтральных частиц вовлекают в своё движение ионы, но не наоборот. Сильнейшие плазменные неоднородности, которые действительно наблюдаются в ионосфере и генерация которых обусловливается электродинамическими процессами (например, плазменные баблы) ни в коем случае не есть возмущениями нейтральной среды. Из многочисленных наблюдений известно, что амплитуды АГВ не превышают 10 - 20 %, а обычно много меньше. Больше бывает только в самих источниках энерговыделения — дугах полярных сияний, метеорах, тех же ядерных взрывах.

Скорости распространения АГВ, во всяком случае, не превышают скорости звука в термосфере 0.6—0.9 км/с (в зависимости от солнечной активности). С другой стороны, скорости МГДволн превышают 1000 км/с. Науке неизвестны типы колебаний околоземной космической среды, скорости которых лежат между указанными значениями (во всяком случае, если говорить о диапазоне частот РС5, специфичном для АГВ). А вот внутри Земли скорости упругих волн, в зависимости от глубины, составляют 6—13 км/с (Р-волна), 4—6 км/с (S-волна), 3 – 4 км/с (поверхностные типы волн). Также известно, что сейсмические колебания посредством генерируемого в атмосфере инфразвука «тянут» за собой ионосферный отклик. Не станем утверждать, но, возможно, на этом пути можно найти правильное объяснение сверхзвуковых скоростей распространения переднего фронта ионосферных возмущений, указанных в [1].

И ещё одно не замечание, а скорее ощущение: авторы пытаются выдать желаемое за действительное. Экспериментальные результаты, на которые они ссылаются, недостаточно точны и однозначны. В то же время за кадром остаются многочисленные релевантные наблюдения АГВ-ПИВ.

Чтобы приведенная критика не выглядела абстрактно, опишем здесь результаты регистрации пространственно-временной динамики ПИВ над Великим восточно-японским землетрясением (11 марта 2011 г., эпицентр около о. Хонсю, M = 9.0) [2]. Сравнение работ [1] и [2] кажется удачным, поскольку на пространственных масштабах ПИВ эпицентральная область даже столь мощного землетрясения выступает квазиточечным источником энерговыделения, аналогичным взрыву.

Работа [2] продолжает серию многочисленных наблюдений ионосферных откликов на приземные источники энерговыделения путём мониторинга полного электронного содержания ионосферы (ПЭС). Территория Японии покрыта плотной сетью GPS-приёмников, в поле зрения которых в момент землетрясения находилось одновременно более 10 спутников GNSS. По данным GPS были составлены карты ПЭС, которые позволили с высоким временным и пространственным разрешением проследить картину возникновения и распространения ионосферного возмущения на расстояниях вплоть до 1500 км от эпицентра. Поскольку значение ПЭС эффективно формируется в области максимума ионосферной концентрации (в данном случае около высоты 250 км), фактически регистрировалась структура горизонтального среза ионосферы на указанной высоте. В интернете размещена



Фрагмент анимации распространения ионосферного возмущения от Великого восточно-японского землетрясения [2, 3]

анимация данных наблюдений [3], фрагмент которой представлен на рисунке. Измерены количественные параметры ПИВ (спектр частот, горизонтальные длины волн, скорости распространения), и на этой основе установлены механизмы генерации ПИВ.

Как видно из рисунка, от эпицентра землетрясения расходятся концентрические возмущения ПЭС. Амплитуды возмущений составляют до 1 TECU (т. е. всего несколько процентов величины ПЭС). Передний фронт распространяется со скоростью 3.5 км/с, что интерпретируется как отклик ионосферы на бегущую по поверхности земли сейсмическую волну. Второй фронт распространяется со скоростью около 1 км/с. Фрагмент анимации распространения ионосферного возмущения от Великого восточно-японского землетрясения [2, 3] — это результат воздействия на ионосферу акустического (инфразвукового) импульса от главного толчка землетрясения. Затем следует длинный цуг АГВ в диапазоне фазовых скоростей 170 — 230 м/с, источником которого являются волны цунами. О «скачковом» и «волноводном» механизмах возбуждения АГВ, фигурирующих в [1], речь не идёт.

Картина волн, представленная на рисунке, внешне похожа на представленную в критикуемой нами работе [1], но имеет кардинально иной смысл и другие количественные характеристики. (Так, различными скоростями распространения характеризуются не последующие фазы волнового процесса, а передние фронты различных процессов).

Резюмируя, мы считаем, что в работе [1] построена не модель ПИВ, а скорее визуальное описание, «фоторобот» ПИВ, причём на ненадёжном наблюдательном материале. Параметры фоторобота подогнаны под эксперименты с воздушными ядерными взрывами и уже поэтому, независимо от степени своей достоверности, имеют мало общего с природной картиной активности термосферы-ионосферы. Чтобы получить представление о последней, рекомендуем читателю ознакомиться с экспериментальными эпюрами, представленными в [4] (глобальная морфологическая структура поля АГВ), [5] (двумерная горизонтальная структура и динамика волнового пакета АГВ-ПИВ над Харьковом) и [6] (типичные формы ПИВ).

- 1. *Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Дорохов В. Л.* Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений // Космічна наука і технологія. — 2016. — **22**, № 5. — С. 3—70.
- Rolland L. M., Lognonn'e P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. – 2011. – 63, N 7. – P. 853–857.
- 3. *Rolland et al.* Collaboration IPGP-GSI, 2011. Интернет ресурс.
- 4. *Скороход Т. В.* Морфологическая структура и возможные источники АГВ в ионосфере // Космічна наука і технологія. 2011. **17**, № 2. С. 61—67.
- 5. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Y. M., Paznukhov V. V., Reinisch B. W., Foster J. C., Erickson P. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics

of TIDs // Radio Sci. -2003. - **38**, N 6. - P. 1102. - doi:10.1029/2002RS002861

6. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия. — 2006. — **46**, № 2. — С. 193—208.

### REFERENCES

- Tyrnov O. F., Fedorenko Yu. P., Dorohov V. L. Spatiotemporal dynamics of traveling ionospheric disturbances. *Kosm. nauka tehnol.*, 22 (5), 3–70 (2016) [in Russian].
- 2. Rolland L. M., Lognonn'e P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the

Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space.*, **63** (7), 853–857 (2011).

- 3. *Rolland et al.* Collaboration IPGP-GSI, 2011. Internet resource.
- Skorokhod T. V. Morphologic structure and possible sources of the AGW generation in ionosphere. *Kosm. nauka tehnol.*, 17 (2), 61–67 (2011) [in Russian].
- Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Y. M., Paznukhov V. V., Reinisch B. W., Foster J. C., Erickson P. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs. Radio Sci., 38 (6), 1102 (2003). – doi:10.1029/2002RS002861
- Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Volnovye processy v ionosfere v spokojnyh i vozmushhennyh uslovijah. 1. Rezul'taty nabljudenij na har'kovskom radare nekogerentnogo rassejanija. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 46 (2), 193–208 (2006) [in Russian].

doi: https://doi.org/ 10.15407/knit2017.02.052 УДК 550.388: 621.396.98: 629.783

## Ю. П. Федоренко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков

# ОТВЕТ НА КОММЕНТАРИЙ Г. В. ЛИЗУНОВА ПО СТАТЬЕ «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ»

Выполнен детальный разбор замечаний Г. В. Лизунова, изложенных в его комментарии на нашу работу «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений», опубликованную в журнале «Космічна наука і технологія».—2016.—22, № 5. Показана глубокая ошибочность суждений автора комментария относительно вопросов обсуждаемой статьи. Иллюстрируются ключевые шаги экспериментальных и теоретических исследований, на основе которых нам удалось предложить радикально новый подход к моделированию процессов зарождения и распространения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Теоретически и экспериментально доказано, что акустико-гравитационные волны (АГВ) на ионосферных высотах могут распространяться со скоростями, в несколько раз превышающими скорость звука. Относительные амплитуды АГВ-ПИВ часто составляют 40—100 %.

**Ключеввые слова:** модель, АГВ-ПИВ, сверхзвуковые скорости, относительные амплитуды возмущений, пространственные и временные квазипериоды

### введение

Цель обсуждаемой статьи состоит в развитии разработанной нами динамической глобальной модели АГВ-ПИВ [31], названной *Ukraine*-2013. Статья сфокусирована на представлении важных (полученных впервые) результатов исследования высокоскоростных динамических процессов, какими являются АГВ-ПИВ, важных не только с научной точки зрения, но и с точки зрения практического применения.

Модель подробно описана в разделе 2 «Описание модели зарождения и распространения АГВ-ПИВ». Все её параметры основываются на результатах теоретических и экспериментальных

© Ю. П. ФЕДОРЕНКО, 2017

исследований семи десятилетий, подробно разъяснены в подразделе «Параметры АГВ-ПИВ полуэмпирической модели». Обоснование выбора этих параметров изложено в разделе 3 «Выбор параметров модели». Направления последующей модернизации модели *Ukraine*-2013 кратко даются в подразделе «Пути совершенствования модели». Нас удивляет, почему оппонент в тексте статьи не смог найти подробное обоснование выбора параметров модели, разъяснение нашего физического подхода к её построению и дальнейшей модернизации. Ведь местоположение описания этих важных вопросов очевидно из указанных выше названий разделов и подразделов.

Далее приводятся ответы на замечания, изложенные в комментарии. Для их аргументации используются ссылки в квадратных и круглых скобках. Первые соответствуют списку литературы из обсуждаемой работы, а вторые — это литература из списка, приведенного в конце настоящей статьи. Ссылки в квадратных скобках свидетельствуют о том, что детальные обоснования и разъяснения параметров модели *Ukraine*-2013 на основе литературных источников были приведены ещё в рецензируемой статье, а ссылки в круглых скобках подтверждают ошибочность суждений оппонента дополнительными публикациями.

## АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ КОММЕНТАРИЯ

Комментарий к нашей статье изобилует ошибочными утверждениями, неточностями, искажениями текста статьи, неконкретными формулировками. Неточности начинаются с самого начала текста комментария: «...в термосфере». Термин «термосфера» в нашей статье вообще не используется. В своих исследованиях мы рассматриваем все области атмосферы. Мы не исключаем из рассмотрения ни одной области потому, что возбуждение АГВ может происходить на любой высоте над поверхностью Земли (ядерными и обычными взрывами, стартами ракет, полетами космических станций, землетрясениями, вулканами, болидами, волнами в океане, высыпаниями частиц и др.).

Автор комментария отмечает, что наши «экспериментальные результаты представляют интерес и, если их очистить от лишних сущностей, заслуживают отдельной публикации», при этом оппонент почему-то забывает уточнить, что в его понимании означает «очистить от лишних сущностей» хорошие экспериментальные данные.

В доказательство своей критики автор комментария приводит (как позитивный образец) пересказ фрагмента статьи Rolland (2011). Однако, сравнивая эту работу с нашей, оппонент сам себе противоречит и дает положительную оценку нашей работы и предложенной нами модели, он пишет: «Картина волн, представленная на рисунке, внешне похожа на представленная на рисунке, внешне похожа на представленную в критикуемой нами работе...». То есть наша модель работает, и результаты экспериментальных исследований (Rolland, 2011) еще раз подтверждают адекватность модели.

## ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2

## Результаты экспериментальных исследований (Rolland, 2011), приведенные в комментариях, подтверждают адекватность модели:

• «Фронт волны в горизонтальной плоскости для шарообразных (точечных) источников представляет собой окружность...» — см. подраздел «Параметры источника» в статье и рис. 1 в комментарии.

• АГВ порождают ПИВ с наибольшей амплитудой вдоль направления распространения, для которого проекция вектора напряжённости геомагнитного поля на волновой вектор АГВ имеет максимальную величину (см. формулу (1) и текст к ней на стр. 11 статьи).

• В табл. 1 статьи модельные скорости распространения экстремумов цуга АГВ-ПИВ указаны в таком последовательности: 11.3, 1.15, 0.68, 0.47, 0.35, 0.28, 0.24, 0.2, 0.18, 0.17 км/с (здесь приведены округлённые значения). В комментарии, сославшись на (Rolland, 2011),



*Рис.* 1. Диаграмма дальность — время значений полного электронного содержания, полученная с применением спутников GPS 21 и GPS 22. Использовались GPS-при-ёмники GEONET. Данные зарегистрированы после Великого восточно-японского землетрясения 11 марта 2011 г., эпицентр которого находился около о. Хонсю в Японии, магнитуда 9.0 (Rolland et al., 2011)



**Рис. 2.** Преобразование временных относительных флуктуаций электронной концентрации  $\Delta N/N$  (*t*), полученных на измерительном пункте ИП, расположенном на фиксированном расстоянии от места ядерного взрыва, в пространственные флуктуации  $\Delta N/N$  (*R*). Здесь *R* — изменяющееся расстояние до ядерного взрыва. Геомагнитная широта ИП составляет около 25°*N*, изменение *R* происходит вдоль геомагнитного меридиана, проходящего через место взрыва. Штриховыми короткими линиями показаны ожидаемые части графиков, вычисленные по эмпирической зависимости, сплошные линии соответствуют экспериментальным данным [23]

значения скоростей ошибочно перечисляются в следующем порядке: 3.5, 1, 0.23-0.17 км/с. Однако в работе (Rolland, 2011) в действительности приводятся скорости ~3, ~1,  $0.255\pm0.01$  км/с. По данным Fig. 2(b) из работы (Rolland, 2011) на рис. 1 нами обозначена (не указанная авторами) скорость перемещения экстремумов цуга со значением около 10 км/с. Здесь же отмечены экстремумы со скоростью перемещения ~ 0.225 км/с.

Таким образом, на Fig. 2(*b*) из (Rolland, 2011) наблюдается ряд скоростей: ~10, ~3, ~1, 0.255, 0.227 км/с. Значения этого ряда очень близки к модельным значениям скоростей (см. выше), что дополнительно подтверждает адекватность нашей модели по новым экспериментальным данным. Модельные значения скоростей (0.2, 0.18, 0.17 км/с) хвостовых экстремумов цуга (из-за их малых амплитуд) в работе (Rolland, 2011) не были зарегистрированы, что вызвано низкой чувствительностью использованного метода диагностики ПИВ.

• В работе (Rolland, 2011) утверждается, что первый тип волн, распространяющийся со скоростью 3 км/с (что превышает скорость звука на высотах 250—300 км более чем в три раза), скорее всего порождён поверхностными волнами Рэлея, второй тип волн (~1 км/с, что также превышает скорость звука) обусловлен акустической волной, принадлежащей к высокочастотной границе АГВ, а третий тип волн является свободно распространяющимися АГВ, в нашей статье этот тип именуется также скачковым.

• Реальные экспериментальные данные всегда включают в себя влияние большого количества различных геофизических факторов, однако даже невооруженным глазом видно хорошее совпадение волновых форм на Fig. 3(*b*) в работе (Rolland, 2011) и на рис. 2 в нашей статье, на котором изображен цуг возмущения, положенный в основу нашей модели АГВ-ПИВ.

Рецензент утверждает, что «скорости распространения АГВ, во всяком случае, не превышают скорости звука в термосфере 0.6—0.9 км/с (в зависимости от солнечной активности)».

Сверхзвуковые скорости горизонтального и вертикального перемещения экстремумов цуга АГВ-ПИВ наблюдаются экспериментально и объясняются теоретическими моделями. Ниже приведены значения сверхзвуковых скоростей экстремумов цуга АГВ-ПИВ для различных источников возмущений, взятые из ряда публикаций.

• После магнитных бурь: 3.391±0.237, 2.12±0.488, 1.769±0.336 (Pradipta et al., 2014); 1.4, 1.342, 1.222 км/с (Афраймович и др., 2004а, 20046, 2005).

• После наземного взрыва: 1.78—1.28 км/с (Daniels et al., 1960); 1.6 км/с (Алебастров и др., 1985).

• После высыпания энергичных частиц в магнитосферный касп: 2—1 км/с [64] (стр. 540, первый абзац).

• После землетрясений: ~10, ~3, ~1 км/с (Rolland, 2011); 6.2, 4.5, 3.9 и 3.5 км/с (Nishitani et al., 2011); 3, 2.6, 2.2 км/с (Ясюкевич и др., 2015; Ясюкевич и др., 2012; Перевалова, 2014; Перевалова и др., 2016); 3.2, 3.07; 2, 1.2 км/с (Jin et al., 2015; Jin et al., 2014); 2.5 и 1.7 км/с (Heki et al., 2006); ~3.3 км/с (Galvan et al., 2012; Occhipinti et al., 2013); 3.2, 2, 1.2 км/с (Jin et al., 2015); 2.5 и 1.7 км/с (Heki et al., 2013); 3.2, 2, 1.2 км/с (Jin et al., 2015); 2.5 и 1.7 км/с (Heki et al., 2006); 3.457 км/с (Tsugawa et al., 2011); 2.31 км/с (Choi et al., 2016); 1.67, 1.44, 1.27 км/с (Chen et al., 2011).

• В монографии (Гершман, 1974) на основе теоретического анализа утверждается, что АГВ, распространяющиеся вертикально, всегда будут сверхзвуковыми (с. 106, предпоследний абзац).

• В разделе «Ключевые теории АГВ-ПИВ» с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований доказывается, что горизонтальная скорость ПИВ может превышать скорость звука в несколько раз, и составлять около 11 км/с.

Относительная амплитуда АГВ-ПИВ часто составляет 40-100 %. Оппонент искажает текст статьи, когда пишет о неприятии тезиса об амплитуде АГВ: «... до 80 % возмущения плотности нейтральной атмосферы». В статье значения «70...80 %» приведены не для нейтральной компоненты атмосферы, а для относительной амплитуды А<sub>д</sub> возмущения электронной концентрации. Величины такого порядка мы находим во многих публикациях. В работе (Bristow et al., 1995) амплитуда ПИВ составляла  $A_d = 40$  %, в [22] — 41—68 %, в (Афраймович и др., 2005) — 50 %, в [23] амплитуда ПИВ изменялась от 30 до 100 %, а по экспериментальным данным из обсуждаемой статьи (которые оппонент не опровергает) — A<sub>d</sub> ~ 40—100 % (см. рис. 23, 26 — 32 и текст к ним). При этом отмечаем, что в настоящее время большинство геофизиков полагает, что А<sub>d</sub> пропорциональна относительной амплитуде АГВ (см., например: Афраймович и др., 2004; 2005).

Автор комментария искажает текст и положения статьи. Рассуждая о модели, оппонент, на наш взгляд, допускает ошибки в ее оценке, забывает о назначении, целях и основах моделирования. Как известно, в соответствии с теорией моделирования, модель должна отображать свойства объекта-оригинала, наиболее существенные с точки зрения цели исследования. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований учёных прошлого века (см. ниже) нам удалось разработать достаточно простую в математическом описании модель. Простота модели является её достоинством, а не недостатком, и позволила нам приблизиться к созданию динамической модели, пригодной для оперативного расчёта долгосрочных прогнозов. Рецензент же даже не упоминает об адекватности нашей модели, его беспокоит лишь то, что на его взгляд «такая модель выглядит весьма примитивно».

• Оппонент называет нашу модель эмпирической, в то время как она является полуэмпирической (такие модели еще называют гибридными). О том, что модель полуэмпирическая, отмечено в аннотации и далее многократно в тексте статьи. Разработанная нами гибридная модель позволяет сочетать высокую точность и надежность эмпирических данных с возможностью теоретического расчета как регулярных параметров *N*, так и текущих характеристик перемещающихся ионосферных возмущений.

• Оппонент рассматривает упругие волны внутри Земли, которые никакого отношения к обсуждаемой статье не имеют. Максимальная рассматриваемая в нашей модели скорость — это скорость распространения лидирующей части цуга возмущения, равная 11.3 км/с.

• Автор рецензии «поправляет» нас: «...при распространении АГВ, колебания нейтральных частиц вовлекают в своё движение ионы, но не наоборот». Однако мы не утверждаем обратное, в статье мы не оспариваем эту концепцию, мы о ней даже не упоминаем.

• В комментарии отмечается, что «стержнем работы является парадоксальная авторская концепция распространения АГВ, состоящая в том, что гребни АГВ движутся с различными априори заданными скоростями...». Отметим, что ещё в аннотации статьи сказано, что не только гребни, но и любой фрагмент цуга АГВ перемещается с постоянной горизонтальной скоростью. Заметим, что парадоксальность концепции не означает её ошибочность. Новый физический эффект часто вначале воспринимается как парадокс.

• Оппонент пишет: «...эмпирическая модель [1] ... калибруется по данным большей частью опубликованным в 1960-х годах несколькими группами авторов, занимавшихся наблюдением ионосферных откликов на воздушные ядерные взрывы», а также «Параметры фоторобота (имеется в виду модель — авторы) подогнаны под данные экспериментов с воздушными ядерными взрывами...». В статье же чётко в разделе 3. Выбор параметров модели (с. 20, колонка правая, последний абзац) указывается, что параметры полуэмпирической модели адаптируются (калибруются) по совершенно иным данным: по ионосферным откликам на извержения вулкана St. Helens 16 мая 1980 г. При этом модель возмущения изотермической атмосферы точечным источником, предложенная в [45, 66], адаптирована не авторами, а в работе [53]. Авторы статьи лишь использовали параметры уже существующей вышеназванной модели, адаптированной по высокоточным данным, полученным в [53].

• Сравнивая нашу работу с образцовой статьей (Rolland, 2011) и отмечая, что в ней, в отличие от нашей работы, не идет речь о "«скачковом» и «волноводном» механизмах возбуждения АГВ", оппонент неправ в использовании терминов, и механизмы распространения (скачковый и волноводный) называет механизмами возбуждения. При этом скачковый способ распространения АГВ вопреки утверждению оппонента упоминается (см. выше) в статье (Rolland, 2011). В нашей статье механизмам распространения посвящен раздел «Гипотезы механизмов распространения АГВ-ПИВ».

Теоретические и экспериментальные исследования, на которых основана обсуждаемая модель, надёжны. Наша модель Ukraine-2013 построена с учетом данных [45, 53, 54, 66]. Авторы статей [45, 66] Лиу и Ех (Liu C. H., Yeh K. C.) разработали общепризнанную в настоящее время модель возмущения атмосферы точечным источником. Параметры этой модели, адаптированные по экспериментальным данным, успешно использованы в работах [53, 54]. В нашей статье (уже адаптированная к реальным условиям) модель возмущения атмосферы применена для разработки динамической модели АГВ-ПИВ. Первый соавтор работ [53, 54] Робертс (Roberts D. H.) в настоящем — известный астрофизик США. Его подход к разработке упрощённых моделей среды распространения АГВ-ПИВ, предложенный в работе [53], успешно применён в его дальнейших исследованиях. Второй соавтор работы [53] Клобучар (Klobuchar J. А.) — ведущий геофизик США 20 века. В работе [53] отмечается, что перед публикацией материалы статьи обсуждались с известными учёными Ex, Poy (Row V.), Еванс (Evans J. V.), Франсис (Francis S. H.), которые являются признанными авторитетами в современной геофизике, теоретических и экспериментальных исследованиях АГВ-ПИВ. Ссылки на их труды имеются в большинстве статей, посвящённых серьёзным исследованиям АГВ-ПИВ. Более детально их вклад в исследование АГВ освещён в следующем разделе.

Оппонент утверждает, что результаты статей [45, 53, 54, 66], на которых мы основываем модель Ukraine-2013, являются апокрифическими. Напомним читателям, что апокрифы — это древние произведения с библейским сюжетом, содержащие отступления от официального вероучения и потому отвергнутые церковью (Словарь русского языка, 1985). Нам кажется, что оппонент единственным сакраментальным произведением считает опубликованную в 1960 г. работу Хайнса (Hines C. O.) [36], именуя все последующие исследования, её развивающие и дополняющие, апокрифическими. Но у этой пионерской, безусловно талантливой работы, имеются и недостатки, они отмечаются в следующем разделе. Оппонент не пытается проверить результаты, полученные по нашей «неправильной» модели (по данным, взятым из доступных литературных источников), а многочисленные результаты верификации, приведенные в статье, просто игнорирует. Так, например, данные важнейших ядерных экспериментов, описанных в работах [1, 23, 26, 39, 46, 48, 55], оппонент считает недостоверными, новые геофизические эффекты, надёжно выявленные в упомянутых работах, он именует парадоксальными, апокрифическими.

## Два примера сумбурных замечаний, приведенных в комментарии.

• Читаем: «Параметры фоторобота подогнаны под данные экспериментов с воздушными ядерными взрывами, и уже поэтому, независимо от своей достоверности, имеют мало общего с природной картиной волновой активности термосферы-ионосферы». Пожалуй, практически в каждой статье по затронутой теме повторяется, что АГВ-ПИВ порождаются различными антропогенными и естественными источниками локального энерговыделения. Автор же рецензии безапелляционно утверждает, что, например, воздушный ядерный взрыв и высыпание энергичных протонов в магнитосферные каспы произведут нечто существенно разное. При этом оппонент ещё и неправильно утверждает, что наша модель калибруется по данным «экспериментов с воздушными ядерными взрывами». Мы свидетельствуем о том, что оппонент намеренно внёс упомянутое искажение в свой отзыв, если бы он указал, что калибровка выполнялась по данным, полученным после взрыва вулкана (естественный источник возмущений), то пришлось бы исключить его надуманное замечание относительно достоверности калибровочных данных и что они «имеют мало общего с природной картиной волновой активности термосферы-ионосферы».

• Автор комментария ошибочно утверждает, что в нашей статье рассматриваются «последующие фазы волнового процесса». А в эталонной для него статье (Rolland, 2011) «различными скоростями характеризуются не фазы волнового процесса, а передние фронты различных волновых процессов». Мы же (в действительности) рассматриваем скорости экстремумов единого волнового процесса, которые в статье (Rolland, 2011) в качестве гипотезы полагаются передними фронтами «различных волновых процессов». В разделе 3 мы доказываем, что наши заключения имеют статус теории, а не гипотезы. Наш подход к исследуемому явлению позволил впервые предложить модель АГВ-ПИВ, которая является общей, единой для крупномасштабных и среднемасштабных неоднородностей атмосферы. При таком подходе излишне привлекать гипотетические передние фронты «различных волновых процессов».

Если наша модель верно описывает пространственно-временную динамику АГВ-ПИВ, но ошибочна только потому, что непонятна автору комментария, то с этим можно было бы примириться. Однако для читателей журнала «Космическая наука и технология» более подробно, чем это было сделано в статье, изложим парадигму исследований АГВ-ПИВ, которая позволила нам разработать адекватную модель *Ukraine*-2013, выявить и объяснить важнейшие геофизические эффекты, которые не поняты автором комментария.

## КЛЮЧЕВЫЕ ТЕОРИИ АГВ-ПИВ

Первая попытка привлечь уравнения геофизической гидродинамики к объяснению природы ПИВ была предпринята Мартын [48]. Предложенная им идея порождения ячеистых волн была очень оригинальной, теоретический анализ выполнен на высоком профессиональном уровне. Поэтому для геофизиков его работа явилась мощным толчком к поиску адекватного решения. Хайнс [36] первым решил в линейном приближении для недиссипативной среды уравнения геофизической гидродинамики, описывающие распространение волн в атмосфере. Он получил дисперсионное уравнение (и поляризационные соотношения к нему), которое, в частности, описывает внутренние гравитационные волны. Из этого уравнения следует, что на больших расстояниях от источника возбуждения (зарождения) АГВ возмущение представляет собой волновой процесс, который характеризуется временным (T) и пространственным (L) периодами, определяемыми свойствами среды распространения.

Вместе с тем наблюдаемые в эксперименте квазигармонические пространственные и временные изменения N в ПИВ эта гипотеза не объясняет (см., например, рис. 2 [23] и 3 [53]). Хайнс для получения аналитического решения уравнений геофизической гидродинамики использовал предположение о том, что относительные возмущения



**Рис. 3.** Квазиволновые временные флуктуации  $\Delta N/N(t)$ , полученные по  $f_0F_2$  при помощи ионозондов, расположенных на пяти различных расстояниях от места низковысотного ядерного взрыва [23]. На рисунке указаны названия пунктов, в которых располагались ионозонды

параметров среды распространения в АГВ много меньше единицы. Без этого ограничения получить его знаменитое (и любое другое) дисперсионное уравнение невозможно. Однако упомянутое условие для глобально наблюдаемых АГВ-ПИВ практически никогда не выполняется. А для АГВ-ПИВ с вертикальной составляющей это условие нарушается всегда ввиду экспоненциального убывания плотности атмосферы с высотой. Такой рост амплитуды АГВ указывается во многих работах, для примера приведём две из них [4, 30]. Коллективное замалчивание нарушения отмеченного условия объясняется желанием получить аналитические решения уравнений геофизической гидродинамики, которые, как ни странно, удовлетворительно описывают многие (но далеко не все) экспериментальные результаты. Парадоксальность этого факта отмечается в обзоре нашей статьи. Так как работа Хайнса и его последователей не объясняет все экспериментальные данные, использует невыполнимые приближения, то теоретические рассмотрения, описывающие распространения АГВ, пока имеют статус не теории, а гипотезы.

Недостатки гипотезы Хайнса особенно ярко проявились при анализе атмосферных возмущений, вызванных ядерными экспериментами. Эти данные наиболее надёжны и документированы. Полной неожиданностью для исследователей явились результаты наблюдений возмущений критической частоты $f_0F_2$  ионосферы, полученные в измерительных пунктах (ИП), расположенных на разных расстояниях (R) от места самого мощного в истории ядерного взрыва. Взрыв с эквивалентной энергией 58 MT THT произведен в СССР на о. Новая Земля 30 октября 1961 г. На пяти ИП в работе (Stoffregen, 1962) приведены временные зависимости  $f_0 F_2(t)$ , а в работе (Kohl, 1964) — скорости (V) перемещения серии максимумов возмущений  $f_0 F_2$ , последовательно появившихся после взрыва на каждом ИП. Эти зависимости  $f_0F_2(t)$  и V(номер максимума) приведены на рис. 4, взятого из работы Роу [55]. Как оказалось, на каждом ИП значения квазипериодов *T* в  $f_0 F_2(t)$  аппроксимируются линейной возрастающей зависимостью от времени, среднее значение Т для каждого ИП линейно возрастает с ростом *R*. В этом эксперименте впервые было выявлено, что с возрастанием временной задержки от момента взрыва (при фиксированных значениях R) каждый новый полупериод временных колебаний превышает смежный с ним предшествующий полупериод. Таким образом, ПИВ представляет собой не гармоническое, а квазигармоническое колебание  $N_m F_2$  во времени.

На зависимостях V(номер максимума) также впервые проявился, на первый взгляд, совершенно парадоксальный эффект, заключающийся в том, что в диапазоне более 4000 км от места взрыва каждый максимум  $f_0F_2$  распространялся со своей, присущей только ему, постоянной скоростью. Значение скорости перемещения максимумов (пронумерованных в процессе их появления) уменьшалось с ростом временной задержки регистрации максимума относительно

**Рис. 4.** a — вариации  $f_0 F_2(t)$ , зарегистрированные на разных расстояниях от места ядерного взрыва по данным [55]. Наименования измерительных пунктов указаны над графиками; б — времена наблюдений максимумов в  $f_0 F_2(t)$  по данным [55]: точки — наблюдения серии из четырёх последовательных максимумов в разных пунктах, косые крестики — наблюдения первого возмущения на ионограммах, квадратики — наблюдения первого возмущения по данным обратного рассеяния. Прямые — линейные аппроксимации. 11:00 МЕТ соответствует 10:00 GMT



момента взрыва (зависимость скорости от номера максимума).

Упомянутые эффекты гипотеза Хайнса [36] объяснить не может. Для их описания в работе [55] была разработана теория возмущения недиссипативной атмосферы точечным источником. В этой теории атмосфера полагалась изотермической, с постоянной скоростью звука, с постоянным ускорением свободного падения. Спустя семь лет разработана аналогичная теория [32]: вычислен отклик атмосферы на точечный источник (локальное воздействие). В этой теории также полагались постоянными скорость звука (они были различными в нижней атмосфере и в термосфере) и ускорение свободного падения. Наглядные результаты расчётов квазигармонических возмущений для высоты *z* = 200 км, заимствованные из этой работы, приводятся на рис. 5 и 6.

На рис. 5 иллюстрируется расширение пространственного цуга АГВ при увеличении временной задержки  $\Delta t$  от момента точечного воздействия. В работе показано, что средние значения горизонтального квазипериода  $\langle L \rangle$  в пространственном цуге АГВ линейно возрастают от 115 км при  $\Delta t = 1$  ч, до 549 км при  $\Delta t = 5$  ч.

Расширение временного цуга и рост среднего значения квазипериода < T > во временном цуге

при возрастании *R* от 1000 до 5000 км показан на рис. 6. В статье установлено, что рост средних значений  $\langle T \rangle$  временного цуга при возрастании *R* и увеличение *T* со временем  $\Delta t$  в цуге происходят по линейным законам.

Если рост  $\langle T \rangle$  при возрастании *R* и увеличение Т во временном цуге впервые выявлены в [55] по данным, взятым из (Stoffregen, 1962), то рост L в пространственном цуге впервые экспериментально обнаружен в [23] (см. рис. 2). Спустя год после публикации [55], в [23], также в ядерном эксперименте, была получена зависимость  $\langle T \rangle (R)$  (см. рис. 7, *a*). Наша модель аппроксимирует её с погрешностью 3.6 % [31] (см. также текст к рис. 14 в статье). Спустя 14 лет после публикации [23] в [53] приведена зависимость T(R), вычисленная по данным, полученным после взрывов ядерных бомб и извержения вулкана (см. рис. 7, б). Таким образом, теория, предложенная Франсис [32], хорошо описывала эффекты, экспериментально выявленные при исследовании АГВ-ПИВ.

За несколько лет до появления теории Франсис опубликованы работы Лиу и Еха [45, 66] с предложенной ими моделью возмущения атмосферы точечным источником. Эта теоретическая модель была подобной теориям Роу [55] и



**Рис. 5.** Пространственные цуги  $\Delta N/N(R)$ , рассчитанные для высоты z = 200 км и разных времён запаздывания  $\Delta t$  от момента точеного воздействия. В угловых скобках указываются средние значения в цуге пространственно-го квазипериода L для каждого значения  $\Delta t$ 

Франсис [32], она также описывала все упомянутые эффекты, обнаруженные при изучении АГВ-ПИВ. Так же, как и в теориях Роу, Франсис, в теории Лиу и Еха благодаря очень упрощённой модели атмосферы удалось получить решение задачи в аналитическом виде. [53] выбрал модель Лиу и Ех для анализа возмущений ионосферы, полученных после взрыва вулкана *St. Helens* (для краткости здесь и ниже мы не будем упоминать соавторов упомянутой работы [53]). Роу, Франсис, Лиу и Ех при расчётах параметров АГВ-ПИВ по своим моделям задавались характеристиками среды распространения воз-



**Рис. 6.** Временные цуги  $\Delta N/N(t)$ , рассчитанные для высоты z = 200 км и разных расстояний R от местоположения точечного воздействия. В угловых скобках указываются средние значения T в цуге временного квазипериода для каждого значения R. Временная ось отсчитывается от появления начального возмущения

мущений на основе существующих в те годы представлений о параметрах атмосферы. Поэтому результаты их расчётов качественно описывали наблюдаемые эффекты, однако количественно отличались друг от друга. же средние параметры атмосферы на время проведения измерений вычислил в ходе адаптации модели Лиу и Еха по высокоточным экспериментальным данным, полученным после взрыва вулкана *St. Helens.* 



**Рис.** 7. a — линейная аппроксимация экспериментальной зависимости длительности первого квазипериода T временных флуктуаций  $f_0F_2$  (t) от дальности R до места низковысотного ядерного взрыва [23]. На рисунке указаны названия пунктов, в которых располагались ионозонды;  $\delta$  — зависимости величины первого (наибольшего) квазипериода T от расстояния R до местоположения локального воздействия: точки — вулкан *St. Helens* [53], квадратики — ядерный взрыв на Новой Земле [55], штрихи — ядерный взрыв в Housatonic [23]

Для анализа экспериментальных данных по скорректированной модели Лиу и Еха [45, 66] Робертс в работах [53, 54] в координатах  $(R, \Delta t)$ рассчитал пространственно-временную динамику экстремумов цуга ПИВ, последовательно возбуждаемых точечным источником. На рис. 8, a [53] и 8,  $\delta$  [54] приводятся в координатах ( $R, \Delta t$ ) местоположения этих экстремумов в виде отрезков прямых, пронумерованных в верхней части графиков. Линейные зависимости положений экстремумов свидетельствует о том, что скорости экстремумов ПИВ (с выбранным номером) в диапазоне R = 0 - 2000 км и интервале  $\Delta t = 0 -$ —200 мин не изменяются. Любая точка на этих отрезках характеризуется одной и той же скоростью V(для выбранного отрезка), равной отношению координаты по R к координате по  $\Delta t$ . Значения V, вычисленные нами упомянутым способом указаны в табл. 1 рецензируемой статьи и представляют собой ключевую часть нашей модели.

Ещё раз отмечаем, что значения *V* мы вычислили по графикам, рассчитанным с использованием теоретической модели возмущения атмосферы то-

еской модели возмущения атмосферы то- относитель

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2

чечным источником, полученной с применением уравнений геофизической гидродинамики. При этом модель атмосферы была адаптирована (скорректирована) на время проведения измерений. Именно поэтому модель *Ukraine*-2013 является полуэмпирической, гибридной моделью: она основывается как на теоретических, так и на экспериментальных результатах.

Следствия, полученные по теоретической модели (постоянство скоростей перемещения экстремумов на расстояниях вплоть до 2000 км), подтверждают экспериментальные данные, приведенные на рис. 4: экстремумы перемещаются с постоянными скоростями, значения которых уменьшаются с увеличением номера последовательно появляющихся экстремумов. Понятно, что рассчитывались скорости только для экстремумов, поскольку максимумы и минимумы удобно выявлять на экспериментальных зависимостях. Однако и любой другой фрагмент цуга АГВ-ПИВ также перемещается со своей скоростью, определяемой его временной задержкой относительно начала возмущения. Например, в



**Рис. 8.** Расчётные значения пространственно-временной динамики экстремумов цуга ПИВ, последовательно возбуждаемых точечным источником в координатах (R,  $\Delta t$ ). Здесь R — расстояние до источника,  $\Delta t$  — временная задержка, отсчитываемая от момента возмущения. Местоположения экстремумов (в виде отрезков прямых) пронумерованы в верхней части графиков. Значение скорости V каждого пронумерованного экстремума указаны в табл. 1 рецензированной статьи; a,  $\delta$  — расчёт выполнен соответственно в работах [53] и [54]

статье табл. 5 иллюстрирует рассчитанные нами скорости нулевых возмущений цуга.

Для верификации (а не калибровки (адаптации), как ошибочно утверждает оппонент) нашей модели мы использовали литературные данные об ионосферных возмущениях, порожденных ядерными взрывами, извержениями вулканов и землетрясениями. Эти эксперименты выполнены при разном времени суток, при различных сезонах года, в высоких, средних и низких широтах, при разных уровнях магнитной и солнечной активностей. В результате оказалось, что модельные скорости экстремумов при различных гелиогеофизических условиях позволяют прогнозировать параметры ПИВ с погрешностью до 12 %.

Эффект постоянства (при различных гелиогеофизических условиях, для различных R) вычисленных нами скоростей перемещения экстремумов цуга позволил продвинуться в разработке глобальной модели электронной концентрации ионосферы реального времени. Мы впервые выявили определяющие параметры модели АГВ-ПИВ, позволяющие по простым формулам вычислять пространственно-временную зависимость N в невозмущённых и возмущённых условиях. Однако, невзирая на хорошие результаты прогноза параметров возмущений, мы планируем (для повышения точности прогноза) уточнять значения V(номер экстремума) привлекая численные решения уравнений геофизической гидродинамики (без их линеаризации) при характерных геофизических условиях высоких, средних и низких широт (см. в статье п. *Пути совершенствования модели*.).

Пространственно-временное постоянство скоростей перемещения экстремумов и их убывание с увеличением номера экстремума в цуге делает очевидным экспериментально обнаруженный линейный рост временных (при увеличении  $\Delta t$ ) и пространственных (при возрастании R) квазипериодов цуга, линейность средних значений пространственных и временных квазипериодов при росте соответственно  $\Delta t$  и R. Поэтому при моделировании пространственно-временных возмущений N мы предложили использовать новые параметры АГВ: постоянные скорости перемещения экстремумов (и всех других фрагментов) цуга. Это позволило разработать модель АГВ-ПИВ, пригодную для оперативного расчета пространственно-временного распределения N реального времени.

Заслуживает дополнительного рассмотрения вопрос о сверхзвуковых скоростях АГВ-ПИВ. Многие геофизики зачастую молчаливо придерживаются мнения о недопустимости таких скоростей. При этом происхождение отдельных гребней цуга бездоказательно приписывают разным физическим эффектам. Так, в (Rolland et al., 2011) выделяется три типа волн, высказывается гипотеза (она упоминается и во многих других работах), согласно которой первый гребень цуга ПИВ (указанный в их статье), перемещения со скоростью <3 км/с, порождён поверхностной волной Рэлея, второй, менее скоростной гребень <1 км/с, является проявлением акустической волны, непосредственно возбуждённой землетрясением, третий — со скоростью ~0.225 км/с обусловлен всенаправленными АГВ-ПИВ. Заметим, что скорость АГВ <1 км/с на высоте около 300 км — это также сверхзвуковая скорость. Какие-либо серьёзные теоретические доказательства существования столь сложного механизма формирования различных гребней единого цуга не приводятся. При этом, например, в (Pradipta et al., 2014) скорость ПИВ ~ 3.4 — 2 км/с наблюдалась после магнитной бури, поэтому причастность волн Рэлея к их порождению исключается.

Вместе с тем в работе (Ясюкевич и др., 2016) при анализе скоростей экстремумов ПИВ, зарегистрированных после землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. (впервые описанного в (Rolland et al., 2011)), также выделяется три типа волн: быстрые возмущения, соответствующие волнам Рэлея, акустико-гравитационные и медленные гравитационные волны. Причастность обнаруженных экстремумов к упомянутым видам волн в качестве предположения основывается только по значениям их скоростей перемещения. При этом в выводах к работе эта гипотеза не упоминается, отмечается только, что обнаружены три моды: быстрая, средняя и медленная.

После локального (точечного) энерговыделения наблюдается возмущение не только атмосферы (и ионосферы), но и геомагнитного поля. При этом возбуждаются серии геомагнитных пульсаций, каждая из которых также (как и АГВ-ПИВ при землетрясениях и других локальных выделениях энергии и импульса) приходит к ИП с убывающими скоростями. Скорость серии уменьшается от номера её появления на ИП. Поскольку энерговыделение происходит в атмосфере (при отсутствии землетрясения), то авторы, открывшие упомянутые серии пульсаций, для их объяснения волны Рэлея не привлекают, они предлагают другие причины. Так, например, в статье (Черногор, 2011) высказывается ряд возможных причин, ответственных за существование последовательно порождаемых серий колебаний напряжённости геомагнитного поля, наблюдаемых после пролёта болида: «Возмущения, вызванные пролетом болида, скорее всего, переносились при помощи медленных МГД волн ( $v \approx 7-8$  км/с), УАГВ ( $v \approx 800-850$  м/с), ВГВ ( $v \approx 400-450$  м/с,  $v \approx 260-280$  м/с) и инфразвука (*v* ≈ 300—340 м/с)». Причастность указанных волн к природе этого нового эффекта обуславливается исключительно по значениям скоростей, какой-либо физический механизм порождения волн не предлагается. Вместе с тем появление всех упомянутых серий колебаний объяснимо с привлечением нашей модели АГВ-ПИВ (Федоренко, 2017, подана в печать).

Таким образом, мы считаем, что оппонент гипотезу, высказанную в работе (Rolland et al., 2011), относительно причастности волн Рэлея к объяснению эффектов, наблюдаемых после землетрясения, ошибочно принял за теорию. В этом заключается источник его неприятия сверхзвуковых скоростей АГВ-ПИВ.

Как показал предшествующий анализ, теория и практика свидетельствуют о том, что на высоте ~300 км АГВ-ПИВ могут распространяться со скоростями от 0.17 до 11 км/с.

Сформулируем основные заключения предшествующего рассмотрения параметров АГВ-ПИВ.

1. Каждый экстремум цуга АГВ-ПИВ распространяется со своей, присущей только ему, постоянной скоростью вдоль всего пути распространения волны.

2. Сверхзвуковые скорости распространения экстремумов ПИВ экспериментально наблюдаются и теоретически объяснимы.

3. АГВ-ПИВ-волна является квазигармонической. Наиболее сильно значения смежных полупериодов отличаются друг от друга в лидирующей части цуга. Почти гармонической волна становится, начиная с седьмого экстремума, после которого различие в скоростях распространения смежных экстремумов резко уменьшается (см. табл. 1 в статье). Поэтому гипотеза Хайнса не отвергается полностью, однако от её исключительного применения для анализа данных АГВ-ПИВ следует воздерживаться.

## выводы

Таким образом, из рассмотрения комментария становится ясно, что её автор исказил основные результаты работы и сделал ряд ошибочных выводов. Поэтому в данной статье приведены дополнительные разъяснения, свидетельствующие о том, что на высоте ~300 км экспериментально обнаруженные скорости экстремумов АГВ-ПИВ (в том числе и сверхзвуковые) объясняются теориями отклика атмосферы на локальное воздействие, опубликованными в 1967—1974 годах. Необоснованное мнение оппонента о том, что амплитуды АГВ-ПИВ «обычно много меньше 10-20 %» мы опровергаем результатами анализа ряда исследований, выполненных в 1968-2016 гг., свидетельствующих о том, что упомянутые амплитуды часто составляют 40-100 %.

- Алебастров В. А., Мальцев А. Т., Троицкий Б. В. Возмущения в ионосфере, вызываемые наземным взрывом // Физика Земли. — 1985. — № 11. С. 55—60.
- Афраймович Э. Л., Башкуев Ю. Б., Бернгардт О. И. и др. Детектирование параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным одновременных измерений электронной концентрации, полного электронного содержания и доплеровского смещения

частоты на радиофизическом комплексе ИСЗФ // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — **44**, № 4. — С. 463—475.

- Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Татаринов П. В. Экспериментальное доказательство существования уединённой внутренней гравитационной волны в атмосфере Земли во время мощной магнитной бури 30 октября 2003 г. // Тр. VII Сессии молодых учёных. Секция «Дистанционное зондирование...», БШФФ. — 2004. — С. 51—53.
- Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Ратовский К. Г. и др. GPS-детектирование уединённых внутренних волн, генерируемых во время мощных магнитных бурь // Распространение радиоволн: Докл. 21 Всероссийской науч. конф. Йошкар-Ола, 2005. Т. 1. С. 124—128.
- *Гериман Б. Н.* Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.
- Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений методом трансионосферного GPS-зондирования: Дис. ... доктора физ.-мат. наук. — Иркутск, 2014. — 286 с.
- Перевалова Н. П., Воейков С. В., Ясюкевич Ю. В. и др. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — 9, № 3. — С. 172—180.
- Перевалова Н. П., Шестаков Н. В., Воейков С. В и др. Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, в дальней от очага зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — 13. № 1. — С. 186—196.
- *Словарь* русского языка. М.: Русский язык, 1985. Т. 1. 699 с.
- Федоренко Ю. П. Возбуждение наземных геомагнитных пульсаций РС5 акустико-гравитационными волнами // Космічна наука і технологія. 2017. 23. № 2.
- Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — **51**, № 1. — С. 119—132.
- Ясюкевич Ю. В., Едемский И. К., Перевалова Н. П. и др. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. — 259 с.
- Ясюкевич Ю. В., Захаров В. И., Куницын В. Е. и др. Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик // Геомагнетизм и аэрономия. — 2015. — 55, №1. — С. 113—122.
- Ясюкевич Ю.В., Перевалова Н.П., Воейков С.В. и др. Землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. как источник ионосферных возмущений // Современная геодина-

мика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе (Материалы Всерос. совещания и мол. школы по совр. геодинамике. г. Иркутск, 23—29 сентября 2012). — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. — Т. 2. — С. 204—208.

- Bristow W. A., Greenwald R. A. Estimating gravity wave parameters from oblique high-frequency backscatter: Modeling and analysis // J. Geophys. Res. – 1995. – 100(A3). – P. 3639–3648.
- *Chen C. H., Saito A., Lin C. H., et al.* Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. 2011. **63**. P. 881–884.
- Choi B. K., Lee S. J., Yoon H. S. Ionospheric TEC Disturbances over South Korea Following the 2011 Great Tohoku Earthquake. Research Inventy // Int. J. Eng. Sci. – 2016. – 6, N 6. – P. 35–42. – Mode of access: www. researchinventy.com.
- Daniels F. B., Bauer S. J., Harris A. K. Vertically traveling shock waves in the ionosphere // J. Geophys. Res. – 1960. – 65. – P. 1848–1859.
- Galvan D. A., Komjathy A., Hickey M. P., et al. Ionospheric signatures of Tohoku-Oki tsunami of March 11, 2011: model comparisons near the epicenter // Radio Sci. 2012. 47, N 4. RS4003. Mode of access: doi:10.1029/2012RS005023.
- Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., et al. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. 2006. 111. B09313. Mode of access: doi:10.1029/2005JB004202.
- Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics // Earth-Sci. Revs. – 2015. – 147. – P. 54–64.
- Jin S., Jin R., Li J. H. Pattern and evolution of seismoionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations // J. Geophys. Res.: Space Phys. – 2014. – Mode of access: doi:10.1002/2014JA019825.
- Kohl W. Acoustic gravity waves caused by the nuclear explosion on October 30th 1961 // Proc. NATO Advanced Study Inst., Skeikampen, Norway. 1963. P. 160–169, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.
- Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., et al. Propagation of large amplitude ionospheric disturbances with velocity dispersion observed by the SuperDARN Hokkaido radar after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. – 2011. – 63. – P. 891–896.
- *Occhipinti G., Rolland L., Lognonné P., et al.* From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The systematic GPS detection of the ionospheric signature induced by tsunamigenic earthquakes // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. –

**118**. – P. 1–11. – Mode of access: doi:10.1002/jgra.50322.

- Pradipta R., Valladares C. E., Doherty P. H. GPS observation of continent-size traveling TEC pulsations at the start of geomagnetic storms // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. 119, N 8. P. 875—879. (AGU PUBLICATION 2014. P. 6913—6924). Mode of access: doi: 10.1002/2014JA020177.
- *Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., et al.* The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. 2011. **63**. P. 853–857. Mode of access: doi:10.5047/eps.2011.06.020
- Stoffregen W. Ionosperic effects observed in connection with nuclear explosions at Novaya Zemlya on October 23 and 30, 1961. — Res. Inst. Natl. Defense, Stockholm, Sweden, FOAS, 1962. — Rapport A517.
- Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., et al. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. 2011. 63, N 7. P. 875—879. Mode of access: doi:10.5047/eps.

## REFERENCES

- *Afraimovich E. L., Bashkuev Yu. B., Bernhardt O. I., et al.* Detection of the parameters of travelling ionospheric disturbances obtained by using data of simultaneous measurements of the electron concentration, total electron content, and Doppler frequency shift obtained at the radiofysical complex of the ISTF. Geomagnetizm i aeronomiya, **44** (4), 463–475 (2004).
- *Afraimovich E. L., Voeikov S. V., Tatarinov P. V.* Experimental proof of a single internal gravitational wave in Earth's atmosphere during powerful magnetic storm on October 30, 2003. *Proceedings of the VII Session of Young Scientists.* Section "Remote sensing ...", BShFF-2004, 51–53 (2004).
- Afraimovich E. L., Voeikov S. V., Ratovsky K. G., et al. GPSdetection of solitude internal waves generated during powerful magnetic storms. In collection of reports of 21 All-Russian Scientific Conference. "Propagation of radio waves", May 25–27, 2005, Yohshkar-Ola, 1, 124–128 (2005).
- Alabasterov V. A., Maltsev A. T., Troitsky B. V. Perturbations in the ionosphere caused by a ground explosion. *Phys. Earth*, N 11, 55–60 (1985).
- *Dictionary* of the Russian language, vol. 1, 699 p. (Russkiy yazyk, Moscow, 1985) [in Russian].
- *Gershman B. N.* The dynamics of the ionospheric plasma, 256 p. (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
- *Chernogor L. F.* Fluctuations of the geomagnetic field caused by the passage of the Vitim bolide on September 24, 2002. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **51** (1), 119–132 (2011).

- Fedorenko Yu. P. Excitation of PC5 terrestrial geomagnetic pulsations by acoustic gravity waves. Kosm. nauka tehnol., 23 (2017). Submitted.
- *Yasyukevich Yu. V., Zakharov V. I., Kunitsyn V. E., et al.* The response of the ionosphere to the earthquake in Japan on March 11, 2011, according to various GPS methods. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **55** (1), 113–122 (2015).
- Yasyukevich Yu. V., Perevalova N. P., Voeikov S. V., et al. Earthquake in Japan March 11, 2011 as a source of ionospheric disturbances. Modern geodynamics of Central Asia and dangerous natural processes: results of studies on a quantitative basis. Siberian Branch of RAS. Institute of the Earth's Crust. Materials of the All-Russian Conference and Youth School (September 23–29, 2012) Irkutsk, 2, 204–208 (2012).
- *Perevalova N. P.* Investigation of ionospheric disturbances by a method of transionospheric GPS sounding. Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Specialty 25.00.29 — Physics of the atmosphere and hydrosphere. Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Irkutsk, 286 p. (2014).
- Perevalova N. P., Voeikov S. V., Yasyukevich Yu. V., et al. The study of ionospheric disturbances caused by the earthquake in Japan on March 11, 2011 by using data of the GEONET network. Sovr. Probl. DZZ Kosm., 9 (3), 172–180 (2012).
- *Perevalova N. P., Shestakov N. V., Voeikov S. V., et al.* Study of the propagation of ionospheric disturbances caused by the Tohoku earthquake in far zone of its center. *Modern problems of remote Earth sensing from Space*, **13** (1), 186–196 (2016).
- *Bristow W. A. and Greenwald R. A.* Estimating gravity wave parameters from oblique high frequency backscatter: Modeling and analysis. *J. Geophys. Res.*, **100**(A3), 3639–3648 (1995).
- Chen C. H., Saito A., Lin C. H., et al. Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 881–884 (2011).
- Choi B. K., Lee S. J., Yoon H. S. Ionospheric TEC Disturbances over South Korea Following the 2011 Great Tohoku Earthquake. Research Inventy. Int. J. Eng. Sci., 6 (6), P 35–42 Issn (e): 2278–4721, Issn (p):2319-6483 (2016), www.researchinventy.com.
- Daniels F. B., Bauer S. J., Harris A. K. Vertically traveling shock waves in the ionosphere. J. Geophys. Res., 65, 1848–1859 (1960).

- Galvan D. A., Komjathy A., Hickey M. P., et al. Ionospheric signatures of Tohoku-Oki tsunami of March 11, 2011: model comparisons near the epicenter. *Radio Sci.*, 47 (4), (2012) RS4003 doi:10.1029/2012RS005023.
- Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., et al. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances. J. Geophys. Res., 111, (2006) B09313. doi:10.1029/2005JB004202.
- Jin S., Jin R., Li J. H. Pattern and evolution of seismoionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations. J. Geophys. Res.: Space Phys., (2014). 10.1002/2014JA019825.
- Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Sci. Revs*, **147**, 54–64 (2015).
- *Kohl W.* Acoustic gravity waves caused by the nuclear explosion on October 30th 1961. Proc. NATO Advanced Study Inst., Skeikampen, Norway. 1963. P. 160—169, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.
- Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., et al. Propagation of large amplitude ionospheric disturbances with velocity dispersion observed by the SuperDARN Hokkaido radar after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 891–896 (2011).
- Occhipinti G., Rolland L., Lognonné P., et al. From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The systematic GPS detection of the ionospheric signature induced by tsunamigenic earthquakes. J. Geophys. Res.: Space Phys., **118**, 1–11 (2013), doi:10.1002/jgra.50322.
- Pradipta R., Valladares C. E., Doherty P. H. GPS observation of continent-size traveling TEC pulsations at the start of geomagnetic storms. J. Geophys. Res.: Space Phys., 119 (8), 875–879 (2014). AGU PUBLICATION 2014. P. 6913– 6924 doi: 10.1002/2014JA020177.
- Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Earth Planets Space, 63 (7), 853–857 (2011).
- Stoffregen W. Ionosperic effects observed in connection with nuclear explosions at Novaya Zemlya on October 23 and 30, 1961, as Res. Inst. Natl. Defense, Stockholm, Sweden, FOAS, Rapport A517, 1962.
- *Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., et al.* Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63** (7), 875–879 (2011). doi:10.5047/eps.

Ответ на комментарий по статье «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений»

#### Ю. П. Федоренко

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

### ВІДПОВІДЬ НА КОМЕНТАР Г.В. ЛІЗУНОВА ДО СТАТТІ «ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИНАМІКА ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ, ЩО ПЕРЕМІЩАЮТЬСЯ»

Виконано детальний розбір зауважень Г. В. Лізунова, викладених в його коментарі на нашу роботу «Просторовочасова динаміка іоносферних збурень, що переміщаються», опубліковану в журналі «Космічна наука і технологія».— 2016. — 22, № 5. Показано глибоку помилковість суджень автора коментаря відносно питань обговорюваної статті. Ілюструються ключові кроки експериментальних і теоретичних досліджень, на основі яких нам вдалося запропонувати радикально новий підхід до моделювання процесів зародження і поширення іоносферних збурень, що переміщаються (ІЗП). Теоретично і експериментально доведено, що акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) на іоносферних висотах можуть поширюватися зі швидкостями, що у декілька разів перевищують швидкість звуку. Відносні амплітуди АГХ-ПІВ часто дорівнюють 40-100 %.

*Ключові слова:* модель, АГХ-ПІВ, надзвукові швидкості, відносні амплітуди збурень, просторові і часові квазіперіоди.

### Yu. P. Fedorenko

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv

### RESPONSE OF THE AUTHORS TO THE COMMENTARY BY G. V. LIZUNOV ON OUR PAPER "SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES""

A detailed analysis of G. V. Lizunov's remarks concerning our article "Spatio-temporal dynamics of travelling ionospheric disturbances" published in "Space Science and Technology".— 2016. — 22, No. 5 is presented. We show that the remarks are deeply mistaken. The key stages of experimental and theoretical studies, which allow us to propose the radically new approach to the simulation of the origination and propagation of travelling ionospheric disturbances (TID), are presented. We have proved theoretically and experimentally that acoustic-gravity waves (AGW) can propagate at ionospheric heights with velocities several times higher than the sound velocity. Relative TID amplitudes can often be in the range from 40 to 100 %.

*Keywords:* model, AGW-TID, supersonic velocity, extremum, relative perturbation amplitude, spatial and temporal quasiperiod.

Редколлегия журнала благодарит Г. В. Лизунова, автора комментария на статью О. Ф. Тырнова, Ю. П. Федоренко, В. Л. Дорохова «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений» и Ю. П. Федоренко, подготовившего ответ на комментарий, за интересную дискуссию, которая будет полезна читателям журнала.

# РОБОЧА ЗУСТРІЧ ДЕЛЕГАЦІЙ КОСМІЧНИХ АГЕНЦІЙ УКРАЇНИ ТА РЕСПУБЛІКИ ПОЛЬЩА



Розвиток сучасних космічних технологій в Україні є важливим чинником, що визначає стратегічне місце держави у світі. Водночас потенціал космічної галузі недостатньо використовується для вирішення актуальних питань науково-технічного, соціально-економічного розвитку суспільства, забезпечення потреб національної безпеки та оборони. З огляду на вищезазначене та відповідно до погоджених заходів двостороннього співробітництва між Польським космічним агентством (POLSA: https://polsa.gov.pl/) і Державним космічним агентством України (ДКАУ: http://www.nkau.gov.ua/NSAU/nkau.nsf) 15 Geрезня 2017 року в Західному науковому центрі НАН України та МОН України у Львові було проведено робочу зустріч делегацій космічних відомств двох країн.

Польську делегацію у складі шести провідних фахівців і науковців космічного відомства очолив виконувач обов'язків президента POLSA Пьотр Сушинські (Piotr Suszynski). ДКАУ представляли начальник управління міжнародних зв'язків цього відомства Роман Федонюк і начальник Національного центру управління та випробувань космічних засобів Володимир Присяжний. У зустрічі також взяли участь керівники підрозділів та дослідники ДП «КБ «Південне» імені М. К. Янгеля» (м. Дніпро), ПАТ «Київський радіозавод», Альянсу «Нова Енергія України» (м. Київ), Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України, Державного науково-дослідного підприємства «Конекс» (м. Львів) і деяких інших організацій.

Розпочав українсько-польський захід директор Західного наукового центру Олег Зинюк із привітання учасників від імені голови Центру академіка НАН України Зіновія Назарчука.

Сторони обговорили низку проблем розвитку космічних технологій, які (тобто проблеми) планується розв'язати шляхом удосконалення державно-приватного партнерства, забезпечення інвестиційної привабливості космічної діяльності тощо. Йшлося, зокрема, про:

• задоволення суспільних потреб у сфері дистанційного зондування Землі, в тому числі для потреб безпеки й оборони, супутникові навігаційні та телекомунікаційні послуги;

• здійснення наукових космічних досліджень, прикладних наукових досліджень у напрямі створення перспективних зразків ракетно-космічної техніки й передових технологій;

• розширення присутності підприємств на регіональному та світовому ринках космічних послуг, забезпечення доступу в космос;

• поглиблення двостороннього співробітництва.

<sup>©</sup> В. Є. КОРЕПАНОВ, 2017

Змістовність дискусій і рівень обговорення сучасних аспектів космічної діяльності України та Польщі представниками POLSA й ДКАУ дає підстави актуалізувати твердження про те, що розвиток космічних технологій є одним із найефективніших засобів стимулювання розвитку високотехнологічних галузей національних економік, визначальним чинником їхньої конкурентоспроможності та удосконалення безпекових секторів країн. Важливо й те, що для української сторони здійснення космічної діяльності суттєво сприяє інтенсифікації міжнародної співпраці та слугує інструментом інтеграції нашої держави до європейських структур, засобом набуття Україною статусу регіонального лідера.

> В. Є. КОРЕПАНОВ Заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН України і ДКА України

**БОРИСОВА Тетяна Олександрівна** — завідувач відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, доктор біологічних наук, професор.

Напрям науки — нейрохімія.

**БУТКО Ігор Миколайович** — начальник центру організації застосування космічних засобів та засобів спеціального контролю Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — методи обробки даних дистанційного зондування Землі, геоінформаційні технології.

**ГАЛКІН МАКСИМ Олексійович** — провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, аспірант.

Напрям науки — нейрохімія.

**ГУСАРОВА Ірина Олександрівна** — начальник відділу фізичних методів контролю матеріалів та конструкцій Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук.

Напрям науки — теплозахист багаторазових космічних апаратів.

**ДУДАРЕНКО Марина Володимирівна** — провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, аспірант.

Напрям науки — нейрохімія.

**ДЬЯЧЕНКО Тетяна Миколаївна** — старший науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем Інституту гідробіології Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — гідробіологія.

**ЄСИПОВИЧ Станіслав Михайлович** — завідувач відділу аерокосмічних досліджень в геології Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», доктор геологічних наук.

Напрям науки — сейсмогеологія та методика вивчення колекторів вуглеводнів геолого-геофізичними методами, циклічність геологічних процесів в формуванні земної кори.

КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович — заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук, заслужений діяч науки й техніки України, лауреат Державної премії та Премії Кабінету Міністрів України, член редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія».

Напрям науки — апаратура та методика дослідження електромагнітних полів і струмів у космічній плазмі.

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

Напрям науки — нейрохімія.

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

Напрям науки — фізика ближнього космосу.

**ЛЯЛЬКО Вадим Іванович** — Почесний директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», головний науковий співробітник, академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки, Лауреат Державної премій в галузі науки і техніки УРСР і України (2004 р.) та премії ім. В. І. Вернадського АН України.

Напрям науки — вивчення енергомасообміну в геосистемах.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 2

**МАМАРЄВ Віктор Миколайович** — провідний інженер відділу науково-дослідної та випробувальної роботи Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — методи обробки даних дистанційного зондування Землі, геоінформаційні технології.

**МІЛІНЕВСЬКИЙ Геннадій Петрович** — завідувач науково-дослідної лабораторії фізики космосу кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізикоматематичних наук.

Напрям науки — астрономія та фізика космосу.

**МОГИЛЬЧАК Владислав Юрійович** — аспірант кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізика атмосфери.

**НАЗАРОВА Анастасія Георгіївна** — провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України.

Напрям науки — нейрохімія.

**ОЖІНСЬКИЙ Віктор Васильович** — начальник відділу науково-дослідної та випробувальної роботи Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — методи обробки даних дистанційного зондування Землі, геоінформаційні технології.

ПАСТУХОВ Артем Олегович — провідний інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, аспірант.

Напрям науки — нейрохімія.

ПІДГОРНЯК Дар'я Леонідівна — аспірант відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

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

Напрям науки — нейрохімія.

ПОПОВ Михайло Олексійович — директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2005 р.). Напрям науки — методи і алгоритми інтерактивної інтерпретації аерокосмічних зображень.

СЕДЛЕРОВА Ольга Володимирівна — учений секретар Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — прогнозування нафтогазоперспективних об'єктів з використанням методів дистанційного зондування Землі, структурної геоморфології і неотектоніки.

**СУХАНОВ Костянтин Юрійович** — старший науковий співробітник відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат технічних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

**ТОМЧЕНКО Ольга Володимирівна** — молодший науковий співробітник відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат технічних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

ФЕДОРЕНКО Юрій Петрович — старший науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедицинської електроніки та комп'ютерних систем, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — розробка і розвиток радіофізичних методів діагностики іоносфери, дослідження іоносферних збурень.

**ФЕДОРОВСЬКИЙ Олександр** Дмитрович — завідувач відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», член-кореспондент НАН України, доктор фізикоматематичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премій України в галузі науки і техніки (2005 р.).

Напрям науки — розробка методології дешифрування космічних знімків на основі використання системного підходу, аналізу структурно-текстурних ознак і на цій основі створення імітаційних еколого-економічних моделей комплексного водокористування.

ФІЛІПОВИЧ Володимир Євгенович — завідувач відділу аерокосмічних досліджень в геоекології Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — методологія екологічного моніторингу в умовах сучасної трансформації урбанізованих територій на основі новітніх супутникових технологій дистанційного зондування Землі, методологія супутникового моніторингу геологічного середовища природних та антропогенових територій.

**ХАРЧЕНКО Сергій Петрович** — головний спеціаліст інформаційно-аналітичного відділу Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Напрям науки — методи обробки даних дистанційного зондування Землі, геоінформаційні технології. **ХИЖНЯК Анна Василівна** — молодший науковий співробітник відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат технічних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

**ЯКИМЧУК Владислав Григорович** — головний науковий співробітник відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», доктор технічних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.